



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH VIBRAČNÍHO GENERÁTORU S PLANŽETOVÝM
ULOŽENÍM**

DESIGN OF VIBRATION ENERGY HARVESTER WITH BLADE JOINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Beňo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Rubeš

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Martin Beňo**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Rubeš**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh vibračního generátoru s planžetovým uložením

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zařízení, které generují elektrickou energii z vibrací, a mohou takto autonomně napájet aplikace internetu věcí, jsou v současnosti intenzivně zkoumány. Cílem je snížit jejich cenu při zachování stávající citlivosti. Alternativou může být konstrukce mechanického rezonátoru na planžetě.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše elektromagnetických vibračních generátorů s důrazem na konstrukci s mechanickou tuhostí.
- 2) Úprava stávající konstrukce pro planžetové uložení.
- 3) Výroba funkčního vzorku a porovnání jeho vlastností s původní konstrukcí.

Seznam doporučené literatury:

BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK, 1994. Mechanické kmitání. Technický. Praha: Sobotáles.

PRIYA, Shashank a Daniel J. INMAN, ed., 2009. Energy Harvesting Technologies. Boston, MA: Springer US.

RUBES, Ondřej, Jan SMILEK a Zdenek HADAS, 2014. Development of vibration energy harvester fabricated by rapid prototyping technology. In: Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014. B.m.: IEEE, s. 178–182.

HADAS, Zdenek a Cestmir ONDRUSEK, 2015. Nonlinear spring-less electromagnetic vibration energy harvesting system. The European Physical Journal Special Topics. 224(14–15), 2881–2896. ISSN 1951-6355.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom vibračného generátora s planžetovým uložením. Jej hlavným cieľom je nie len návrh funkčnej konštrukcie, ale aj zaujímavé podanie danej problematiky. Vibračný generátor s planžetovým uložením je praktický lacný na výrobu a hlavne veľmi jednoduchý. Základným konštrukčným prvkom vibračného generátoru je kmitajúci rám na planžete, ktorý je nositeľom magnetov. Elektrická časť generátoru pozostáva z magnetického obvodu a cievky navinutej na statickom držiaku. Kmitajúci rám s magnetmi vytvára zmenu magnetického poľa, čím v cievke indukuje napätie. Pre návrh konštrukcie bol použitý program Inventor. Pre výpočet magnetického obvodu bol zvolený program FEMM ovládaný pomocou programu MATLAB. Na výpočet statickej a dynamickej analýzy sa zvolil program ANSYS.

Abstract

This bachelor thesis deals with the design of vibration generator with blade joint. Firstly, its main aim is to design a working vibration generator, and secondly is to entice the reader to continue on with reading. Such a vibration generator is a handy, inexpensive to manufacture, and especially very simple. The basic design element of the vibration generator is oscillating frame connected to the blade joint and is the carrier of the magnets. The electrical part of the generator consists of a magnetic circuit and coil on the static bracket. Oscillating frame with magnet creates a changing magnetic field and induces voltage in the coil. For the design of the construction was used the program Inventor. For the calculation of the magnetic circuit has been selected, the program FEMM controlled by MATLAB. For the calculation of the static and the dynamic analysis was chosen the program ANSYS.

Kľúčové slová

Energy Harvesting, elektromagnetická indukcia, planžetové uloženie, Inventor, Matlab, Femm, Ansys, Simplify 3D, 3D tlač

Keywords

Energy Harvesting, electromagnetic induction, blade joint, Inventor, Matlab, Femm, Ansys, Simplify 3D, 3D printing

Bibliografická Citácia

BEŇO, M. *Návrh vibračního generátoru s planžetovým uložením*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124766>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Rubeš.

Ja, Martin Beňo, prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Návrh vibračného generátora s planžetovým uložením vypracoval samostatne, pod vedením vedúceho práce Ing. Ondreja Rubeša, a zároveň s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky uvedené v zozname použitej literatúry na konci práce.

Martin Beňo

Brno

Touto formou by som sa chcel vrelo poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce, p. Ing. Ondrejovi Rubešovi, za jeho ochotu, pomoc a hlavne správne nasmerovanie počas písania práce. Obzvlášť mu ďakujem za jeho flexibilitu v časoch celosvetovej pandémie, kedy mi poskytol rady vďaka ktorým bolo možné doviestť moju bakalársku prácu až do úspešného konca.

Martin Beňo

Obsah

1	Úvod	10
2	Motivácia a ciele práce	11
3	Energy Harvesting	12
3.1	Popis Energy Harvestingu	12
3.2	Vibrácie ako zdroj pre EH generátor	13
3.2.1	Použitie piezoelektrického materiálu	13
3.2.2	Elektrostatická indukcia	14
3.2.3	Elektromagnetická indukcia	15
4	Elektromagnetické vibračné generátory	17
4.1	Prehľad vyvinutých lineárnych generátorov	17
4.1.1	Yates	18
4.1.2	Saha	19
4.1.3	Rhinefrank	20
4.1.4	Prudell	21
5	Koncepcia vibračného generátora s planžetovým uložením	23
5.1	Generátor a jeho časti	23
5.1.1	Mechanická časť	23
5.1.2	Elektromagnetická časť	24
5.2	Planžetové uloženie	24
5.3	Kmitanie a vibrácie	24

6	Návrh geometrie	26
6.1	Prvotný návrh	26
6.1.1	Kmitajúci rám	26
6.1.2	Základňa	27
6.1.3	Planžeta a jej uloženie	27
6.2	Finálna podoba	28
6.2.1	Kmitajúci rám	28
6.2.2	Základňa	30
7	Simulácie generátora	32
7.1	Magnetická simulácia	32
7.2	Simulácia dynamiky sústavy	37
8	Výroba	41
8.1	3D tlač	41
8.2	Lepenie magnetov	42
8.3	Výroba cievky	45
9	Meranie charakteristík generátora a porovnanie s pôvodným typom	47
9.1	Porovnanie s východzím generátorom	48
9.1.1	Meranie charakteristík voľného kmitu bez záťaže	49
9.1.2	Meranie charakteristík voľného kmitu so záťažou $2000\ \Omega$	51
9.1.3	Meranie optimálnej záťaže	53
9.2	Meranie frekvenčných charakteristík vyrobeného generátora	54
10	Záver	59
	Literatúra	62
	Zoznam obrázkov	64

1 Úvod

Kedysi si ľudia v domácnostiach vystačili s jedným rádiom a domácou pevnou linkou. Batérie v zariadeniach, ktoré sa nenapájali zo siete boli menené len zriedka. Súčasná rýchlo-meniaca sa a konzumná doba posúva náš každodenný život rýchlo vpred. Nové technológie a produkty sú navrhované tak, aby vyvolali dojem potreby u ľudí, ktorá spočíva v ich atraktivite a nespočetnom množstve funkcií. Z bežne dostupných produktov sa stávajú smart systémy, ktoré vytvárajú väčšie požiadavky na dodávky elektrickej energie.

Dodávanie energie, spotrebovanie energie – začarovaný kruh. Veľké požiadavky na výkon si žiadajú zároveň veľké výdavky energie. Energia je všade dostupná okolo nás, len ju musíme vedieť spracovať; teda nejakým spôsobom premeniť a ďalej využiť na to čo potrebujeme. Mechanická energia (pr. vibrácie), energia získaná z elektromagnetického poľa (pr. indukovanie napätia na cievke), alebo dokonca využívanie prírodných zdrojov (pr. vietor). Možností je mnoho, musíme si len vedieť správne vybrať a vhodne ich implementovať.

V súčasnej dobe venujeme množstvo času výskumu mikrosystémov, senzorom a inteligentným systémom. Tieto súčiastky sú navrhované tak, aby požiadavky na príkon boli čo najnižšie, čím teda niektoré zariadenia už nemusia byť napájané len zo siete alebo z batérií. A tu prichádza na rad Energy Harvesting (EH). Doposiaľ veľmi sľubná technológia zaoberajúca sa zberom nie veľkého množstva ambientnej energie. Takáto energia môže slúžiť na napájanie bezdrôtových zariadení, alebo pre aplikácie, kde použitie batérie je vysoko nepraktické ako sú napríklad rôzne snímače na neprístupných a vzdialených miestach.

Vibrácie sú častokrát nežiadúcim elementom vyskytujúcim sa u mnohých strojárenských systémov. Takáto situácia predstavuje perfektnú možnosť ako využiť mechanickú energiu a premeniť ju na energiu elektrickú, s možnosťou napájania menších zariadení. Vyššie spomenutá premena energie predstavuje cieľ bakalárskej práce, a zároveň poskytuje náhľad na samotný vývoj, konštrukciu a funkčnosť zariadenia.

2 Motivácia a ciele práce

Motivácia k vypracovaniu záverečnej práce je využitie čo najširšieho spektra z poskytovaných informácií v obore mechatroniky na VUT a následné vyrobenie zariadenia, ktoré bude nielen hmatateľné, ale aj naozaj funkčné.

Na VUT sa v priebehu rokov predstavilo už viacero variant generátorov a to, či už elektromagnetických, alebo piezoelektrických. Hlavnou problematikou je alternatíva konštrukcie mechanického rezonátora ukotveného na planžete. Cieľom je pokračovať vo vývoji ďalšieho generátoru, a preto bude podrobne popísaný celý postup pri návrhu elektromagnetického generátoru s využitím planžetového uloženia. Ďalším zámerom je, aby celková výrobná cena a čas potrebný na výrobu zvoleného generátoru boli čo najnižšie pri súčasnom zachovaní čo najvyššej citlivosti generátoru.

Nakoľko sme na konštrukcii generátora pracovali od úplného začiatku a súčasne na jeho viacerých parametroch súbežne, pokladám túto prácu za perfektný príklad mechatronického prístupu. Nakoľko nám na začiatku neboli dané presné špecifikácie jednotlivých parametrov, bol zvolený iteračný postup návrhu. Pri vývoji generátora bol daný dôraz najmä na frekvenciu rezonančného mechanizmu, adekvátnu konštrukciu a vhodný výber magnetov.

Ako posledným cieľom bolo zostavenie funkčného prototypu elektromagnetického vibračného generátora s planžetovým uložením a jeho porovnanie s už vyvinutým podobným generátorom na VUT.

3 Energy Harvesting

3.1 Popis Energy Harvestingu

V súčasnej dobe je skúmané a vyvíjané získavanie energie z ambientných zdrojov tak, aby nebolo nutné využívať neobnoviteľné nerastné suroviny ako zdroj energie. Avšak doposiaľ je možné získať iba obmedzené množstvo z ambientných zdrojov energie pomocou EH. Prvé EH zariadenia boli vyvinuté a otestované na prelome tisícročí. Určitá forma energie je vyvinutá pri každom procese, alebo činnosti aj keď býva častokrát vedľajším efektom. Z čoho nám vyplýva, že je to časté plytvanie energiou, ktorá by mohla byť spracovaná a využitá inak.

Ak dospeje vývoj EH tak ďaleko, že dokáže úplne nahradiť batérie, tak by mohol predstavovať obrovskú ekologickú úľavu pre všetky systémy. Medzi jeho hlavné výhody patria [1] :

- Bezúdržbové: v jednotlivých zariadeniach, alebo celých systémoch, by už nebola potrebná výmena batérie. To by znamenalo nižšie náklady na prevádzku a servis.
- Environmentálne prijateľné: najčastejším problémom býva v súčasnej dobe odpad vzniknutý pri výrobe a použití batérií. V posledných rokoch sa rozpráva o tom, ako sú jednotlivé články akumulátorov v nových elektromobiloch neekologické, a výnimkou nie sú ani batérie použité na napájanie mikrosenzorov alebo MEMS. Batérie predstavujú nebezpečný odpad nakoľko sa v nich nachádzajú toxické látky ako olovo, ortuť alebo zinok.
- Otvorené dvere do sveta pre ďalšie aplikácie: vývoj predstavuje dokonalú príležitosť na využitie ďalších EH bezdrôtových senzorov na monitorovanie veľmi vzdialených, alebo podvodných systémov. Vývoj EH senzorov predstavuje možnosť ich montovania na miestach, kde to doposiaľ nebolo možné kvôli náročnosti servisu (výmena batérií, montovanie potrebnej kabeláže) a ich neprístupnosti. Toto všetko predstavuje možnosť získania informácií a dát potrebných ku vytvoreniu nových odvetví vedy a biznisu.

Obnoviteľné zdroje energie premieňajú energiu z už existujúcich zdrojov v danom prostredí na elektrickú energiu. Najpriaznivejšími zdrojmi ambientnej energie pre EH sú napríklad [2]:

- Svetelná energia: zdroj svetla, napríklad slnečné svetlo
- Termálna energia: malý termoelektrický generátor produkuje elektrickú energiu, pokiaľ je vhodne umiestnený do teplotného gradientu

3 ENERGY HARVESTING

- Prietok objemu: plyny a kvapaliny
- Mechanická energia: pohybová energia a vibrácie.

V prípade, že sa pri vývoji EH vyberie správny zdroj energie s ohľadom na okolie a podmienky, kde sa bude systém nachádzať, je možné takmer s určitostou nahradiť obyčajné batérie pre skoro všetky bezdrôtové senzory, ktoré sa nachádzajú na trhu v dnešnej dobe. V tom najlepšom prípade bude možné mnohonásobne zvýšiť prenos dát, zatiaľ čo sa zníži celková cena systému skrz nízke alebo takmer žiadne náklady na údržbu batérii. [3]

Niekoľko takýchto zdrojov, ako napríklad svetelná a termálna energia, boli už skúmané a využité na použitie v mikroenergetických zdrojoch. Avšak, je nutné brať ohľad na aplikácie, kde je nedostatok svetla alebo termálnej energie. Príkladom môžu byť veľké strojovne, kde musíme uvažovať o využití iného typu zdroja energie, ktorú môže predstavovať mechanická energia v podaní vibrácií. [3]

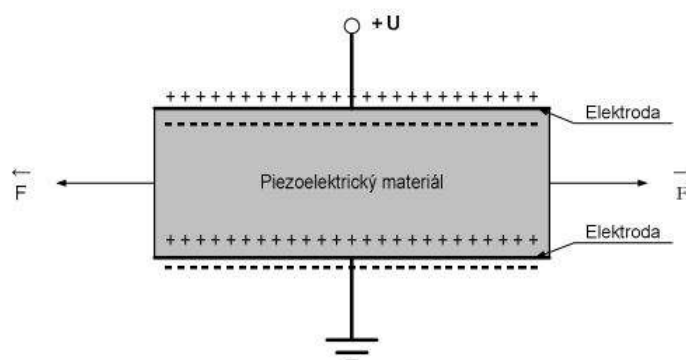
3.2 Vibrácie ako zdroj pre EH generátor

Vibrácie sa nachádzajú v drvivej väčšine strojárenských sústav alebo systémov a sú excellentným zdrojom ambientnej energie. Vibrácie ako mechanická energia môže byť premenená na elektrickú energiu niekoľkými spôsobmi. Ako uviedli C. B. Williams a R.B. Yates, sú tri metódy premeny energie z okolitých vibrácií na energiu elektrickú:

- použitie piezoelektrického materiálu
- elektrostatická indukcia
- elektromagnetická indukcia. [2]

3.2.1 Použitie piezoelektrického materiálu

V prípade, že sa pri vibráciách použije piezoelektrikum, dochádza k tzv. piezoelektrickému javu. Piezoelektrický jav je schopnosť jednotlivých kryštálov určitého materiálu generovať elektrický náboj pri deformácii.



Obr. 3.1: Princíp piezoelektrického javu [5]

3 ENERGY HARVESTING

Pôvodne sú ióny kryštálovej mriežky pravidelne usporiadané, ale pri mechanickom namáhaní kryštálu sa negatívne a pozitívne ióny vychýlia zo svojich pozícií, čím dochádza k deformácii kryštálu tak, že sa na niektorých plochách objaví elektrický náboj. Na elektródach je tak výsledný náboj s opačnou polaritou, než je orientácia elektrických dipólov v materiáli [5].

3.2.2 Elektrostatická indukcia

Základnou súčiastkou pri metóde elektrostatickej indukcie je doskový kondenzátor. Doskový kondenzátor pozostáva z dvoch platní, ktoré sú od seba oddelené nejakým izolátorom, ako napríklad vzduch. Nabitím dosiek kondenzátoru určitým napätím U sa vytvára na doskách rovnaký, ale opačný náboj Q . Kapacitu kondenzátoru môžeme vypočítať ako

$$C = \frac{Q}{U} \quad (3.1)$$

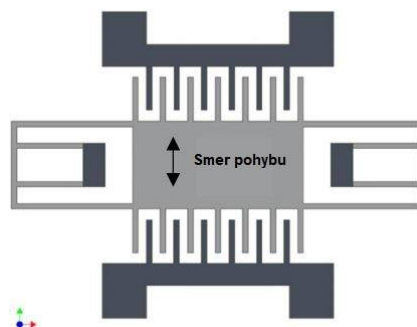
kde C je kapacita kondenzátoru vo faradoch, Q je náboj na doskách v coulomboch a U je napätie na doskách kondenzátoru vo voltoch. Dosky kondenzátoru s takýmto nábojom pôsobia na seba silou

$$F = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot S \cdot \frac{U^2}{d^2} \quad (3.2)$$

Kde ε je permeabilita materiálu dosiek kondenzátoru v Hm^{-1} , S je plocha dosiek kondenzátoru v m^2 a d je vzájomná vzdialenosť dosiek kondenzátoru v m (zväčša v radoch nm až μm).

Získať energiu pomocou elektrostatickej indukcie je možné tak že je vykonaná práca pohybom dosiek kondenzátoru proti elektrostatickej sile medzi doskami. Elektrostatické generátory je možné klasifikovať na tri základné typy [6]

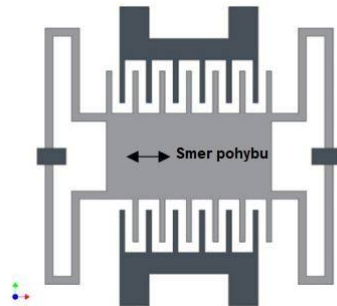
- Premennivé prekryvanie dosiek v rovine



Obr. 3.2: Premennivé prekryvanie dosiek v rovine [5]

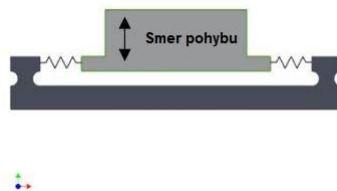
3 ENERGY HARVESTING

- Uzatváranie medzery v rovine



Obr. 3.3: Uzatváranie medzery v rovine [5]

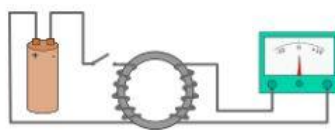
- Uzatváranie medzery mimo rovinu



Obr. 3.4: Uzatváranie medzery mimo rovinu [5]

3.2.3 Elektromagnetická indukcia

Elektromagnetický generátor využíva princíp premeny energie kinetickej na elektrickú pomocou elektromagnetickej indukcie, s ktorou prišiel Michael Faraday v roku 1831.



Obr. 3.5: Diagram Faradayovho pokusu [7]

Tento fyzikálny zákon hovorí o tom, že indukované elektromotorické napätie sa v akoľvek uzatvorenom obvode rovná miere zmeny magnetického indukčného toku skrz daný uzatvorený obvod. Matematicky to môžeme vyjadriť ako [7]

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.3)$$

Kde U_i je indukované napätie a Φ je magnetický tok. Hlavnou podmienkou pre vznik indukovaného elektromotorického napätie je, aby magnetické pole bolo meniace sa v čase, tak ako to je uvedené matematickým vyjadrením (3.3).

Podľa Maxwell-Faradayovej rovnice platí, že na pevne navinutú cievku tvorenú z N iden-

3 ENERGY HARVESTING

tických závitov ktorými prechádza rovnaký magnetický tok je výsledné indukované elektromotorické napätie popísané ako

$$U_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.4)$$

Avšak vzťah je možné upraviť, ale len za predpokladu, že cievka je v homogénnom magnetickom poli, čiže magnetický tok prechádzajúci závitmi cievky je v každom mieste rovnaký a orientovaná ľubovoľná plocha je rovinná. Magnetický tok je možné na základe týchto predpokladov vyjadriť ako

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (3.5)$$

Kde B predstavuje magnetickú indukciu a S je ľubovoľná rovinná plocha. Po dosadení do vzorca 3.5 do 3.4, tak získame upravený vzťah

$$U_i = N \cdot B \cdot l \cdot v \quad (3.6)$$

Kde N je počet závitov cievky, B je veľkosť magnetickej indukcie, l je dĺžka jedného závitu na cievke a v je rýchlosť ktorou sa cievka pohybuje kolmo na dané magnetické pole.

Keďže Lorentzova sila hovorí, že na jednu čiastočku o elektrickom náboji q ktorá sa pohybuje rýchlosťou v a nachádza sa v elektrickom poli E o magnetickej indukcii B pôsobí sila F ktorú môžeme matematicky vyjadriť ako [7] :

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (3.7)$$

Potom môžeme vzťah 3.3 odvodiť veľmi jednoducho pomocou rovnosti Lorentzovej a elektrickej sily, a to ako:

$$B \cdot Q \cdot v = Q \cdot E \quad / \div Q \quad (3.8)$$

$$E = B \cdot v \quad / \times l \quad (3.9)$$

$$E \cdot l = B \cdot v \cdot l \quad (3.10)$$

$$U = B \cdot v \cdot l \quad (3.11)$$

$$U = B \frac{ds}{dt} l = B \frac{dS}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.12)$$

Najviac produkovanými EH sú elektromagnetické a piezoelektrické generátory. Všeobecne sa dá povedať, že sú svojimi rozmermi elektromagnetické EH väčšie ako tie piezoelektrické, ale na druhej strane majú možnosť vyprodukovať vyšší výstupný výkon.

Výber správnej a vhodnej transformácie ambientnej energie na elektrickú energiu, čiže výber vhodného fyzikálneho princípu, veľmi úzko súvisí s čo najlepšou efektivitou EH, tak isto ako aj samotný zdroj ambientnej energie.

4 Elektromagnetické vibračné generátory

Elektromagnetické zariadenia sa začali využívať na generovanie elektrickej energie začiatkom 30. rokov minulého storočia. Bolo tomu tak hlavne vďaka Faradayovým zásadným poznatkom o elektromagnetickej indukcii. Prvotne to boli obyčajné rotačné generátory ako napríklad:

- hydroelektrické generátory
- veterné generátory
- parné generátory [4] .

Neskôr sa to dostalo až ku vývoju EH, kde sa všeobecne zväčša využíva lineárny princíp pohybu:

- s posuvnou väzbou (pohyb po priamke)
- s rotačnou väzbou (pohyb po kružnici) [4] .

4.1 Prehľad vyvinutých lineárnych generátorov

Práve lineárne elektromagnetické generátory sú obzvlášť vhodné na harmonické pohyby akými sú napríklad vodné vlny, alebo vibrácie. Nakoľko lineárne generátory oproti rotačným generátorom nevyžadujú žiaden mechanizmus pre konverziu rotačného pohybu na lineárny, je ich efektivita omnoho vyššia ako u rotačných generátorov pri vibráciách s rovnakými vstupnými rýchlosťami. Z toho dôvodu sú lineárne elektromagnetické generátory prirodzene výhodnejším mechanizmom na spracovanie mechanických vibrácií v prospech premeny na elektrickú energiu. Vibračné EH sa v súčasnosti využívajú najmä na napájanie elektroniky malých až stredných rozmerov medzi ktoré radíme snímače MEMS, alebo bezdrôtové senzory. [4]

4 ELEKTROMAGNETICKÉ VIBRAČNÉ GENERÁTORY

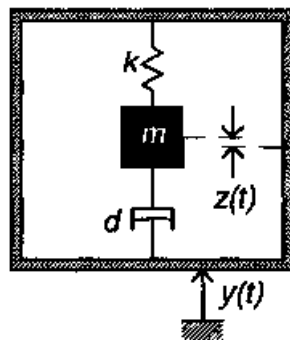
4.1.1 Yates

C.B. Williams a R.B. Yates ukázali v roku 1995, že získanie elektrickej energie z už existujúceho vibračného zdroja je možné realizovať. Týmto predložili tzv. všeobecnú metodológiu návrhu pre lineárne generátory. Sami navrhli lineárny elektromagnetický vibračný generátor o milimetrových rozmeroch pre napájanie senzorov na monitorovanie kondície mostov [4] .

Generátor, ktorý navrhli má približné rozmery 5x5x1mm. Podľa analýz bolo uvedené, že produkovaný výkon je proporcionálny tretej mocnine mechanických vibrácií a zväčšením výchylky kmitajúcej hmoty je možné doceliť zvýšenie výkonu. Predpokladali výkon 1 μ W pri frekvencii 70Hz a 0.1mW pri frekvencii 330Hz a predpokladaná výchylka tohto zariadenia bola 50 μ m [2] .

Schematicky popísali ich generátor, ktorý pozostáva z kmitajúcej hmoty ktorej zotrvačnosť má za následok zrýchlenie nosnej pružiny, m na pružine k a tlmiči d ktorý predstavuje istý prevodník medzi energiou mechanickou na energiu elektrickú. Pre analýzu bol využitý predpoklad, že hmotnosť vibračného zdroja je ďaleko väčšia než kmitajúca hmotnosť v generátore a zároveň že vibračný zdroj má neobmedzené množstvo energie. To znamená, že zdroj vibrácií nie je nijako ovplyvnený kmitajúcou časťou generátoru. Diferenciálna rovnica, ktorá popisuje pohyb kmitajúcej hmoty vzhľadom na puzdro generátoru, môže byť odvodená z dynamických síl pôsobiacich na hmotu. Pokiaľ obal generátoru kmitá s výchylkou $y(t)$, tak relatívny pohyb kmitajúcej hmoty k obalu generátoru je $z(t)$ a diferenciálna rovnica pohybu je

$$m\ddot{z}(t) + d\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (4.1)$$



Obr. 4.1: Schéma generátoru [2]

kde m je kmitajúca hmota, d je konštanta útlmu a k je konštanta pružiny [2] . Tento generátor je inerciálnym zariadením, čo znamená, že je potrebné ho mechanicky ukotviť iba do jedného bodu. Týmto sa líši od väčšiny elektromechanických meničov. Inerciálny generátor môže byť prakticky uchytený ku akémukoľvek pohybujúcemu sa telesu, tak aby generoval elektrickú energiu. Pre daný generátor sa rozhodli premeniť mechanickú energiu na elektrickú pomocou elektromagnetickej indukcie [2] .

4 ELEKTROMAGNETICKÉ VIBRAČNÉ GENERÁTORY

Výsledkom výskumu bolo dokázané, že generovanie síce nie veľkého ale praktického množstva elektrickej energie z mechanických vibrácií v malom zariadení, je možné. Dvomi najväčšími poznatkami sú: 1) pre najväčší výstupný výkon generátoru je potrebné rezonančnú frekvenciu nastaviť tak, aby sa čo najviac, alebo až úplne zhodovala s frekvenciou vibračného zdroja, 2) aby celé zariadenie bolo navrhnuté s čo najväčšou výchylkou kmitania [2].

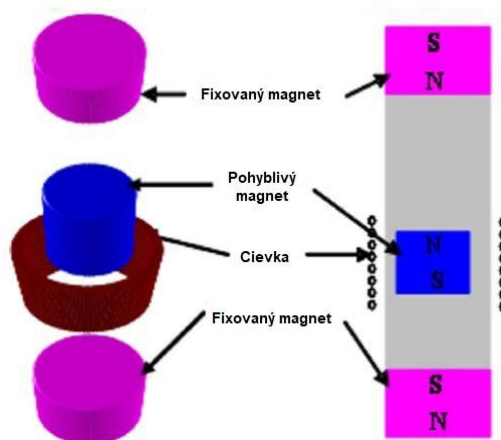
4.1.2 Saha

Saha a kolektív prišli v roku 2008 s možnosťou implementovania lineárneho elektromagnetického EH do každodenného sveta. Aplikovali poznatky z predošlých vývojov a využili to v prospech ich výskumu. Do tej doby bolo mnoho návrhov, ktoré využívali kmitajúcu hmotu budenú okolitými vibráciami, ale väčšina bola využitá iba v laboratórnych podmienkach s kontrolovanými vibráciami a bez ďalších zámerov pre aplikácie v bežnom živote [8].

Tak ako sami popisujú, aj v tomto smere sa našlo zopár výnimiek, ako napríklad Glynn Jones a kolektív, ktorý testovali svoj elektromagnetický generátor v motorovom priestore. Taktiež je možné hovoriť o niekoľkých pokusoch implementovania EH, ktoré sú schopné premeniť energiu ľudského pohybu na elektrickú energiu. Logicky sa mnoho z nich zameralo na zavedenie istého druhu generátoru do topánok, nakoľko práve v nich je vysoký potenciál zberu prebytočnej energie. Implementovaniu EH sa venoval výskum Kymissis s kolektívom, kedy umiestnili piezoelektrický článok do podrážky topánky, ktorý dokázal generovať v priemere 1 až 2 mW počas obvyčajnej chôdze [8].

Avšak, kvôli nízkej frekvencii a nepravidelnosti ľudského pohybu nemusí byť rezonančný generátor najvhodnejším prístupom. Vibrácie produkované pohybom ľudského tela nemajú sínusoidný charakter, takže rozhodujúcim faktorom je zvoliť vhodnú štruktúru generátora, ktorá má schopnosť vibrovať aj mimo rezonančné parametre [8].

Saha s kolektívom použili vo svojom generátore magnetickú pružinu namiesto obvyčajnej mechanickej a verili, že to prinesie mnoho výhod, medzi inými aj jednoduchú konštrukciu, nenáročne ladenie a menšie riziko poruchy.



Obr. 4.2: Štruktúra generátoru s magnetickou pružinou [8]

4 ELEKTROMAGNETICKÉ VIBRAČNÉ GENERÁTORY

Využili primitívnu konštrukciu a z ich vývoja vzišiel malý generátor, o niečo väčší ako bežne AA batérie rúrkovitého tvaru. Na jeho koncoch sú pevne fixované dva magnety a dovnútra umiestnili jeden voľne pohybujúci sa magnet tak, že plochy naproti sebe majú rovnakú polarizáciu takže sa navzájom odpudzujú. Následne obmotali cievku okolo obalu a keď celý generátor vibruje tak prostredný magnet taktiež vibruje hore-dole a tým pádom sa indukuje napätie na cievke. Veľkou výhodou tohto generátoru je naozaj jednoduchá a primitívna konštrukcia [8] .



Obr. 4.3: Porovnanie veľkosti generátoru oproti AA batérií [8]

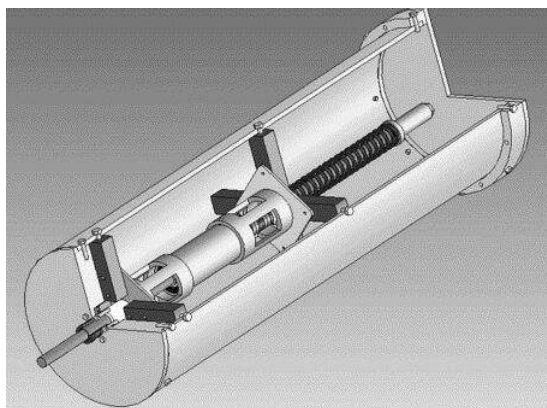
Myšlienka tohto vibračného elektromagnetického generátoru bola veľmi dobrá. Malý generátor, ktorý dokáže premeniť ľudský pohyb na elektrickú energiu a svojím výkonom napájať elektroniku nosenú na ľudskom tele. Nanešťastie to ale má jednu veľkú nevýhodu ktorou je samotný obal generátora. Cievky na tomto generátore sú navinuté na nevodivý plastový valec, ktorý má zbytočne veľkú vzduchovú medzeru a to vedie ku veľkému magnetickému odporu, tým pádom nie je schopný využiť celkový magnetický tok [4] .

4.1.3 Rhinefrank

Rhinefrank a kolektív prišli v roku 2005 s návrhom ako využiť energiu morských vln. Verili, že ak by sa aspoň 0.2% nevyužitej energie z oceánov spracovalo, mohla by táto energia postačovať pre celý svet [9] .

Priority konštrukčných kritérií, medzi ktoré patrí funkšnosť aj v drsnejších podmienkach, spoľahlivosť a udržiavateľnosť, viedli k rozhodnutiu použiť lineárny elektrický generátor. Takéto zariadenie má nízke mechanické opotrebenia v dôsledku nízkych relatívnych rýchlostí. Navrhovali bóju, ktorá využíva vertikálny pohyb morských vln na napájanie lineárneho generátora. Generátor sa skladá zo systému s permanentným magnetickým polom, ktorý je montovaný na centrálnom hriadeľi a armatúry, v ktorej sa generuje energia. Centrálna hriadeľ je ukotvený k morskému dnu, a bója, respektíve plavák, pohybuje cievkami ktoré sú uložené v armatúre relatívne k centrálnemu hriadeľu tak aby sa indukovalo napätie. Takýto spôsob návrhu uloženia má veľký potenciál na plné využitie magnetického toku na výrobu elektrickej energie [9] .

4 ELEKTROMAGNETICKÉ VIBRAČNÉ GENERÁTORY

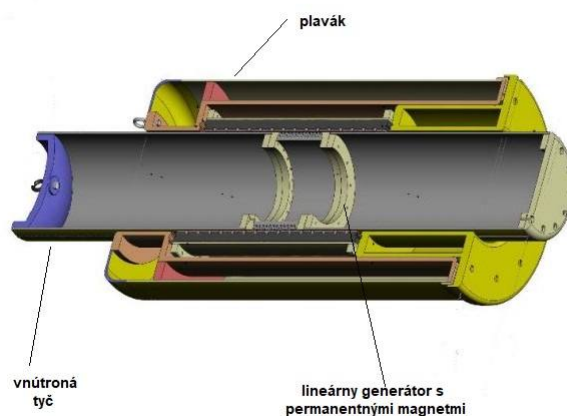


Obr. 4.4: Model generátoru [9]

Výsledkom ich práce bolo plne fungujúce a otestované zariadenie so schopnosťou generovať až výkon 50W. Tento výkon zariadenia vo vlnách 1,5m naznačuje v celku uspokojivé splnenie ich stanovených cieľov týkajúcich sa spoľahlivosti a životnosti. Týmto projektom chceli poukázať na to, že takéto malé demonštračné zariadenie predstavuje systém na zber energie z morských vln ako jednu z možných alternatív k mechanicky zložitejším systémom [9] .

4.1.4 Prudell

Prudell a kolektív sa rozhodli využiť ako zdroj ambientnej energie taktiež morské vlny, ale zvolili jemne iný prístup ako Rhinefrank. Rhinefrank využíval vertikálny smer morských vln, kdežto Prudell s kolektívom sa rozhodli využiť naopak lineárny smer vln ako zdroj energie. Použili valcový tvar lineárneho vibračného generátoru ktorý pozostáva z vnútornej valcovitej tyče, plaváku a rúrkového lineárneho generátoru s permanentnými magnetmi (PMTLG) [10] .



Obr. 4.5: Lineárny prierez generátora [10]

4 ELEKTROMAGNETICKÉ VIBRAČNÉ GENERÁTORY

Tyč je vnútornou časťou generátoru o valcovitých rozmeroch zhruba 0.6 m na šírku a 3.3 m na výšku. Táto tyč je upevnená k veľkej reakčnej doske, ktorá ju drží takmer nehybne pri pohybe vln. Plavák je vonkajšou časťou generátoru o približných rozmeroch 1.3 m na šírku a 2.3 m na výšku. Plavák sa pohybuje voľne v reakcii na hydrodynamickú silu spôsobenú vlnami. PMTLG je tvorený cievkami a magnetmi. Magnety sa nachádzajú na vnútornom priemere plaváku a cievky sú umiestnené na vonkajšom obale staticky umiestnenej tyči, čiže keď sa plavák začne pohybovať v reakcii naorské vlny, tak magnety prechádzajú okolo navinutých cievok a tým sa indukuje napätie. Jednotlivé komponenty ktoré použili boli stanovené iteračným prístupom tak aby celkový výkon generátoru dosiahol zhruba 1 kw pri vlnách o výške 1.0 až 1.5 m [10] .

Avšak tento typ generátoru má aj svoje nevýhody a jednou z nich je použitie množstva permanentných magnetov, čo sa rapídne odzrkadlí na celkovej cene generátoru. Druhou nevýhodou je, že tieto magnety sú magnetizované v radiálnom smere a takéto magnetické pole je omnoho menšie ako axiálne magnetizované permanentné magnety [4] .

5 Konceptia vibračného generátora s planžetovým uložením

Ako už bolo spomenuté v úvode, cieľom práce bolo vyrobiť plne funkčný vibračný generátor. Tento vibračný generátor s planžetovým uložením využíva vibrácie na premenu mechanickej energie na elektrickú, pomocou elektromagnetickej indukcie. Je mnoho možností ako takúto, zdanlivo jednoduchú, problematiku vyriešiť no vzhľadom na danú aplikáciu bolo rozhodnuté o skonštruovaní nenáročného generátora. Jedná sa o jednoduché uloženia planžety s mechanickým oscilátorom ktorý má vnútorne uložené magnety a kmitá okolo staticky upevnenej cievky.

5.1 Generátor a jeho časti

Každý jeden diel generátora bol navrhovaný iteračným spôsobom. V prvom rade bol navrhnutý celkový vzhľad a jednotlivé uloženia tak, aby celok korektne fungoval. Celkové konštrukčné riešenie prezentovaného vibračného generátora je možné rozdeliť na dve základné časti, a to:

- Mechanická časť
 - Základňa
 - Kmitajúci rám
- Elektromagnetická časť
 - Horizontálne magnety
 - Vertikálne magnety
 - Cievka

5.1.1 Mechanická časť

Mechanickými prvkami vibračného generátora je *základňa* a *kmitajúci rám*.

Základňa je elementárnym prvkom predstavovaného generátora. Na tento kus sú upevnené všetky diely generátora. Na jednom z koncov sa nachádza uloženie planžety, v prostrednej časti je možné nájsť priestor pre uchytenie horizontálnych magnetov a na druhom konci je v spodnej časti uchytenie pre držiak cievky. Samotnú základňu tvoria dva dielce, ktoré sú navzájom spojené v štyroch miestach skrutkovým spojom.

5 KONCEPCIA VIBRAČNÉHO GENERÁTORA S PLANŽETOVÝM ULOŽENÍM

Kmitajúci rám je prakticky srdcom popisovaného vibračného generátora. Rám má na svojej zadnej časti úzku medzeru do ktorej je vložená planžeta a po bokoch stiahnutá dvomi skrútkami, tak aby bola zovretá napevno. Predná časť rámu je o niečo členitejšia. Na vrchnej a spodnej časti sú umiestnené dva väčšie magnety v horizontálnej polohe. Vo vnútri sú magnety menších rozmerov nalepené na feromagnetickú podložku vo vertikálnej polohe ktoré vytvárajú vhodné podmienky potrebné pre elektromagnetickú indukciu.

5.1.2 Elektromagnetická časť

Elektromagnetická časť pozostáva z *horizontálnych* a *vertikálnych magnetov* ktoré ideálne dopĺňajú celý proces vibračného generátora s planžetovým uložením a premenou energie pomocou elektromagnetickej indukcie.

Horizontálne magnety sú nalepené na kmitajúcom ráme a základni. Tieto magnety sú natočené na seba plochami so zhodnými pólmi tak, aby sa navzájom odpudzovali. Tieto magnety vytvárajú tzv. magnetickú pružinu.

Vertikálne magnety sa nachádzajú v prednej časti kmitajúceho rámu. Magnety sú po stranách nalepené na kus ocele čím sa uzatvára magnetický obvod.

Cievka je navinutá na navíjač vyrobený z plastu, ktorý je uchytený do samostatného držiaku. Cievka je týmto spôsobom uložená staticky. Vertikálne magnety sa pohybujú vďaka vybudeným vibráciám, čím je magnetické pole meniace sa v čase a tým pádom sa na tejto staticky umiestnenej cievke tvorí indukované napätie.

5.2 Planžetové uloženie

V priebehu posledných rokov vzniklo na VUT niekoľko typov EH generátorov, ktoré využívajú rôznorodé metódy a technológie. Cieľom tejto záverečnej práce, bolo využiť planžetové uloženie. Planžeta je obecné tenká pružná kovová doštička. Je možné povedať že jej výška je len veľmi malým percentom z jej šírky alebo dĺžky. Spočiatku sa môže svojimi podmienkami javiť táto navrhnutá konfigurácia ako naozaj vhodná na použitie piezoelektrického materiálu naneseného na planžetu. Avšak, jednou z prvotných myšlienok záverečnej práce bolo vytvoriť generátor ktorý nebude finančne náročný. Kvôli tomuto aspektu sa upustilo od možnosti využitia piezoelektrika. Samozrejme, zo začiatku prichádzalo do úvahy niekoľko variant planžiet rôznych rozmerov. Výsledné rozmery a ďalšie informácie budú podrobnejšie popísané v nasledujúcich kapitolách.

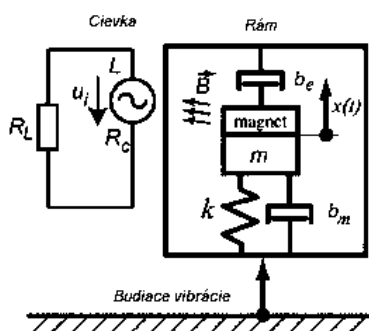
5.3 Kmitanie a vibrácie

Tak ako je tomu u väčšiny generátorov, aj v tomto prípade je snahou premeniť mechanickú energiu na elektrickú energiu. Mnoho bežných generátorov, ako aj napríklad dynamo, funguje na jednoduchom princípe elektromagnetickej indukcie. Skladá sa zo statoru tvoreného magnetom, a rotoru ktorý je možné pre jednoduchosť reprezentovať ako hriadeľ s navinutou cievkou.

V takýchto prípadoch je mechanická energia reprezentovaná rotačným pohybom. V prí-

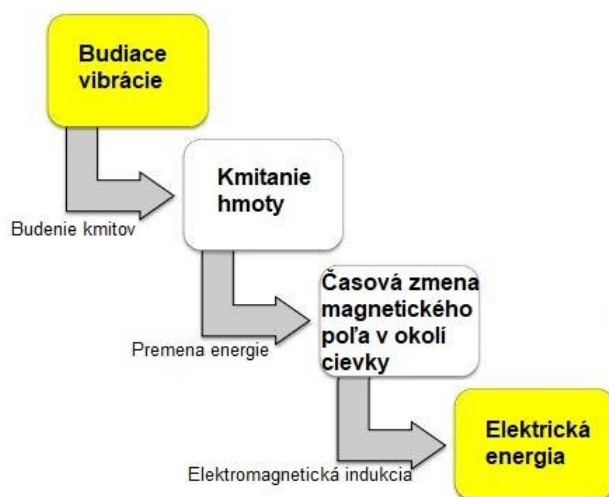
5 KONCEPCIA VIBRAČNÉHO GENERÁTORA S PLANŽETOVÝM ULOŽENÍM

pade prezentovaného vibračného generátora nie je vstupom rotačný pohyb, ale ako samotný názov hovorí, vstupom do generátoru sú vibrácie. To nám napovedá, že pohyblivou časťou vibračného generátora s planžetovým uložením nie je otáčajúci sa rotor konštantnou rýchlosťou, ale kmitajúci rám s meniacou sa rýchlosťou v čase osadený na planžete.



Obr. 5.1: Schématický diagram elektromagnetického vibračného generátora [11]

Princíp premeny mechanickej energie na elektrickú je možné popísať schémou na Obr. 5.2. Budiace vibrácie rozhýbu hmotu, v tomto prípade kmitajúci rám. Jedná sa o takzvané kinematické budenie. Pri tomto kmitaní dochádza ku premene energie. V tomto prípade ide o relatívny pohyb magnetického poľa okolo cievky. Tým dochádza ku elektromagnetickej indukcii čím vzniká elektrická energia. Kmitajúci rám je uložený tak, aby mu bolo umožnené sa pohybovať v smere budiacich vibrácií. Pružina je v tomto prípade predstavovaná sústavou horizontálnych magnetov. Tlmenie je nežiadúcim efektom. Keďže nič nie je dokonalé, aj u tohto generátora musíme rátať s určitým trením čím dochádza k tlmeniu [12] .



Obr. 5.2: Schéma premeny energie [12]

6 Návrh geometrie

Návrh modelu je prvoradým a kľúčovým krokom ku akémukoľvek ďalšiemu postupu. Takéto zariadenie nie je možné vyrobiť na prvý pokus. Je potrebné, aby tomu predchádzalo niekoľko návrhov a simulácii. Keďže na začiatku neboli dané presné kritéria parametrov, ku samotnému návrhu sa pristupovalo iteračným spôsobom. V prvom kroku bol vytvorený hrubý náčrt, ktorým sa určilo uloženie planžety. Od konkrétneho návrhu uloženia planžety sa následne odvíjala ďalšia geometria generátora.

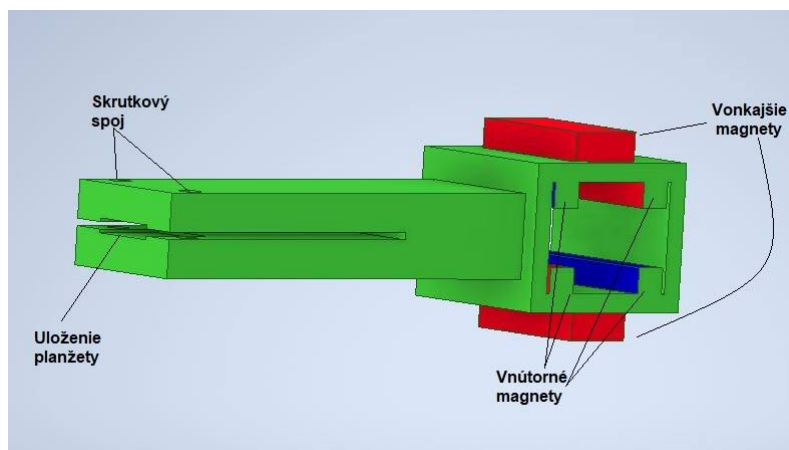
V súčasnej dobe nie je efektívne navrhovať takto komplexné modely ručne na papier. Preto bolo siahnuté po 3D modelovacom programe **Inventor**.

Inventor je jeden z množstva grafických parametrických 3D modelovacích programov. Umožňuje tvorbu nielen 2D výkresovej dokumentácie, ale aj adaptívne a parametrické navrhovanie 3D modelov. Základom konštruovania v Inventore sú súčasti, ktorých geometria sa odvádza od 2D náčrtkov. Jednotlivé súčasti je ďalej možné skladať do zostáv pomocou rôznych väzieb. Tento program má mnoho výhod, napríklad vizuálna predstava celkovej geometrie, rýchla a jednoduchá zmena parametrov podľa potreby. To všetko rapídne zníži celkový čas návrhu a následnej výroby.

6.1 Prvotný návrh

6.1.1 Kmitajúci rám

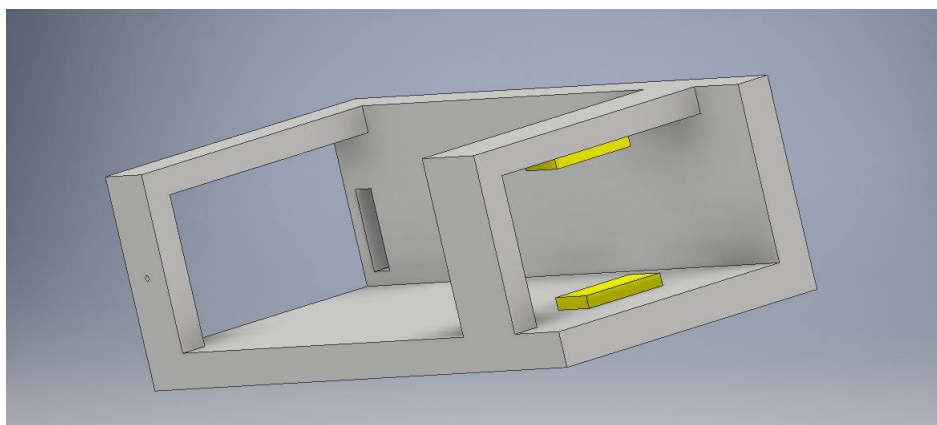
Prvotnou myšlienkou kmitajúceho rámu bolo dlhé rameno na konci zakončené otvoreným kvádrom s vnútornými (vertikálne magnety) a vonkajšími magnetmi (horizontálne magnety). Uloženie vnútorných magnetov a cievky bolo navrhnuté do roviny kolmej na rovinu kmitania. Na začiatku ramena bol vytvorený malý otvor pre vloženie planžety a po bokoch otvoru dve diery, určené pre skrutku s maticou, tak aby sa vytvorilo fixné spojenie planžety s rámom.



Obr. 6.1: Prvotný návrh rámu

6.1.2 Základňa

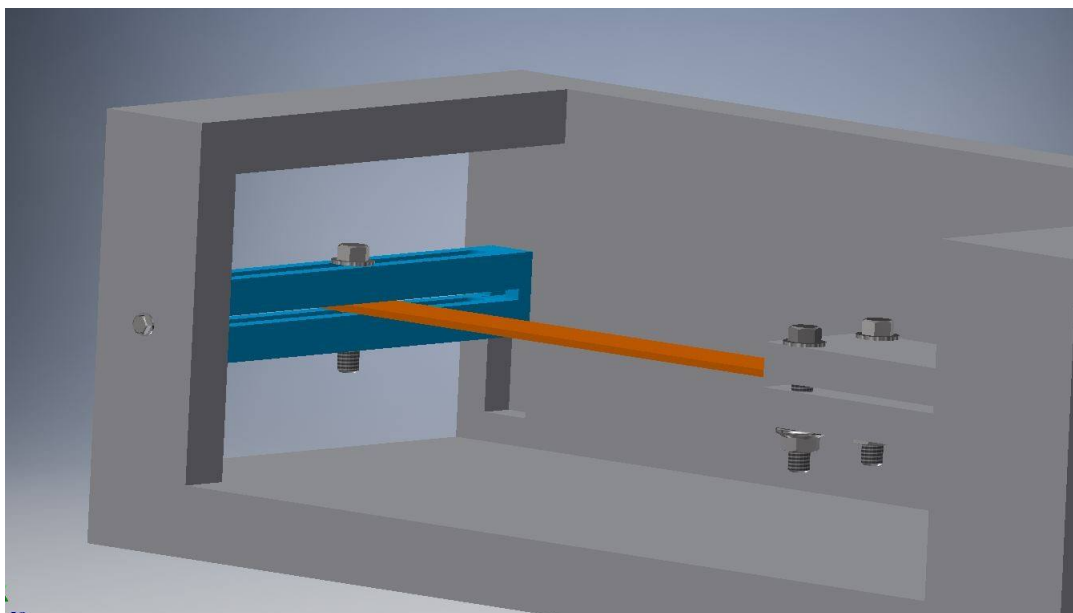
Základňa bola pôvodne navrhnutá ako pevná podložka v tvare písmena L. Na jej jednom konci bolo vytvorené miesto pre držiak planžety a na konci opačnom konštrukcia s magnetmi, ktoré dotvárali magnetickú pružinu ku kmitajúcemu rámu.



Obr. 6.2: Prvotný návrh podstavca

6.1.3 Planžeta a jej uloženie

Pôvodná idea mala zámer uchytiť planžetu do prípravku o tvare kváдру a zaistiť ju skrutkou. Celý prípravok by sa vložil do základne, ktorá mala pripravené výrezy na kontrovanie prípravku a následne spevnenie skrutkami. Každopádne takéto prevedenie nie je úplne praktické, už len z dôvodu nutnosti prevrátať planžetu kvôli uchyteniu. Akákoľvek výmena planžety za inú by bola zbytočne komplikovaná.



Obr. 6.3: Pôvodné uloženie planžety

Po dôkladnom zhodnotení prvotného návrhu celkovej konštrukcie sa ukázalo niekoľko krokov k možnému zlepšeniu. Predovšetkým šlo o pootočenie kváдру s magnetmi na planžete. Bolo rozhodnuté o umiestnení vnútorných magnetov do roviny zhodnej s rovinou kmitania. Keďže celá konštrukcia mala byť vyrobená z plastu pomocou metódy 3D tlače, veľký dôraz bol kladený na geometriu prvkov. Jednotlivé diely sa navrhli tak, aby neutrpeľi nechcené škody pri vibráciách a dokázali vstupné vibrácie správne spracovať v kmitanie.

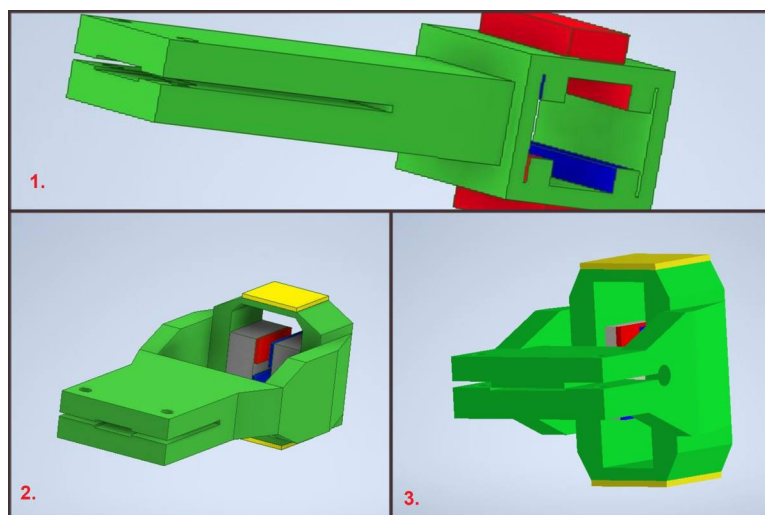
6.2 Finálna podoba

Konečný model generátora bol navrhnutý až po niekoľkých iteráciách simulácií a následných prvých vytlačených kusoch. Najväčšie zmeny sa objavili pri navrhovaní kmitajúceho rámu.

Hlavnou prioritou pri modelovaní bol samotný kmitajúci rám, tak aby všetko presne do seba zapadlo. Materiál bol postupne odoberaný a pridávaný na miestach, kde to bolo potrebné. Taktiež myšlienka utahovania skrutiek maticami bola pozmenená za jednoduché vloženie závitových vložiek. Tieto nadmieru vyhovujú a sú schopné splniť účel v tomto prípade úplne rovnako.

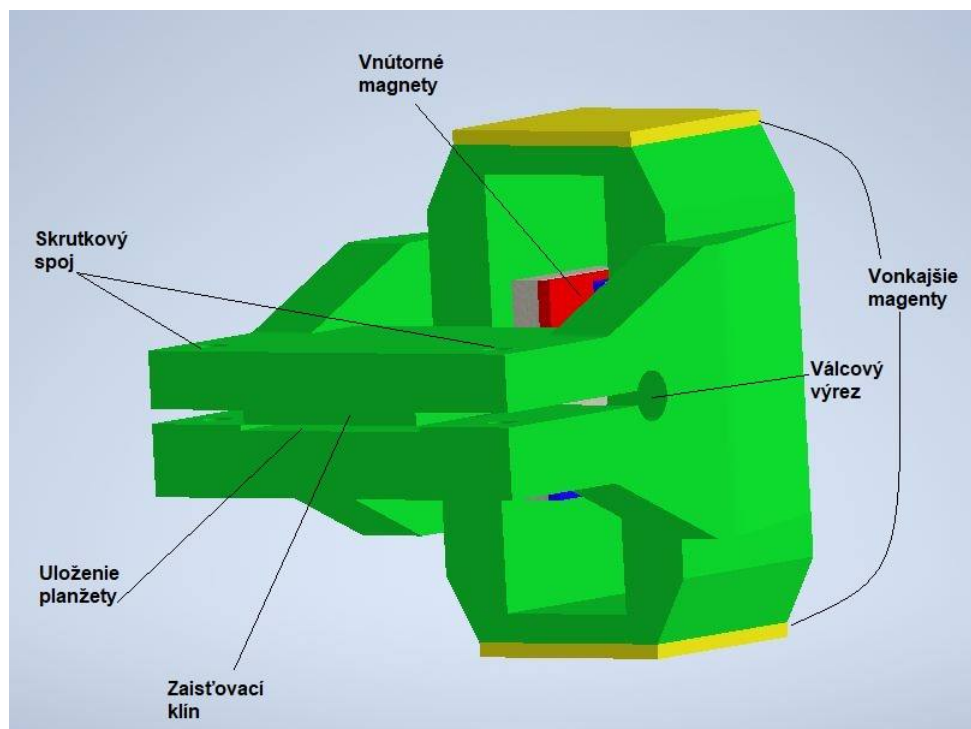
6.2.1 Kmitajúci rám

U kmitajúceho rámu došlo k rapídному zmenšeniu oproti prvým navrhovaným verziám. Z prednej časti, kde sú uložené magnety, vedú bočné rebrá, ktoré sa šikminou napájajú na zadnú časť. V zadnej časti ostal výrez pre uloženie planžety takmer nezmenený, až na to, že z vrchnej časti pribudla zarážka, ktorá pri stiahnutí skrutkami po bokoch omnoho pevnejšie drží planžetu vo svojej pozícii.



Obr. 6.4: Vývoj kmitajícího rámu

Jednou z posledných zmien bolo vytvorenie valcového výrezu po celej šírke rámu. Keďže rameno rámu rapídne stratilo na svojej dĺžke, bolo takmer nemožné pevne stiahnuť konce rámu a tým vytvoriť stabilné uloženie planžety. Takýto valcový výrez umožnil pevne stiahnuť vrchnú a spodnú časť ramena skrutkami k sebe. Ďalšou výhodou tohto výrezu je, že pôsobí ako koncentrátor napätia čím sa posúva medza únavy.

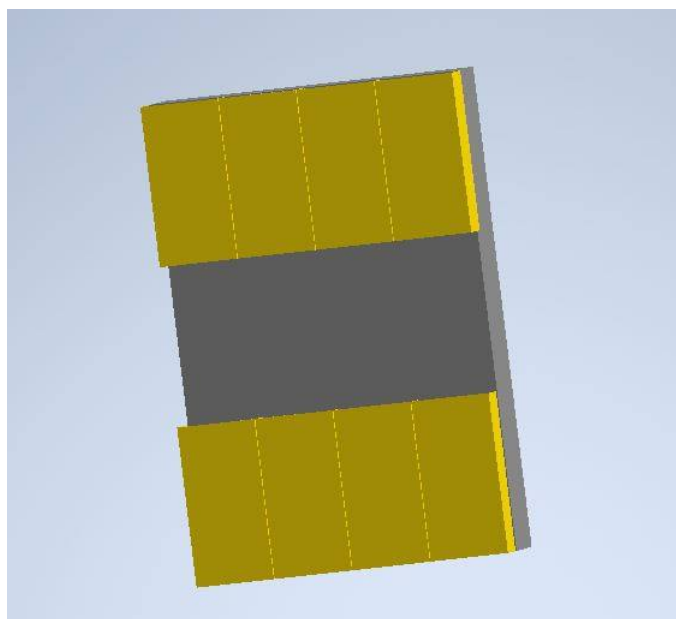


Obr. 6.5: Kmitajúci rám generátora

6 NÁVRH GEOMETRIE

U vonkajších magnetov je možné pozorovať zmenu rozmerov. V čase výberu magnetov boli už známe približné rozmery rámu a podľa toho boli vyberané vhodné magnety. Pre magnetickú pružinu boli vybrané neodymové magnetické kvádre o rozmeroch 30x30x2 mm, ktoré sú magnetizované kolmo na plochu.

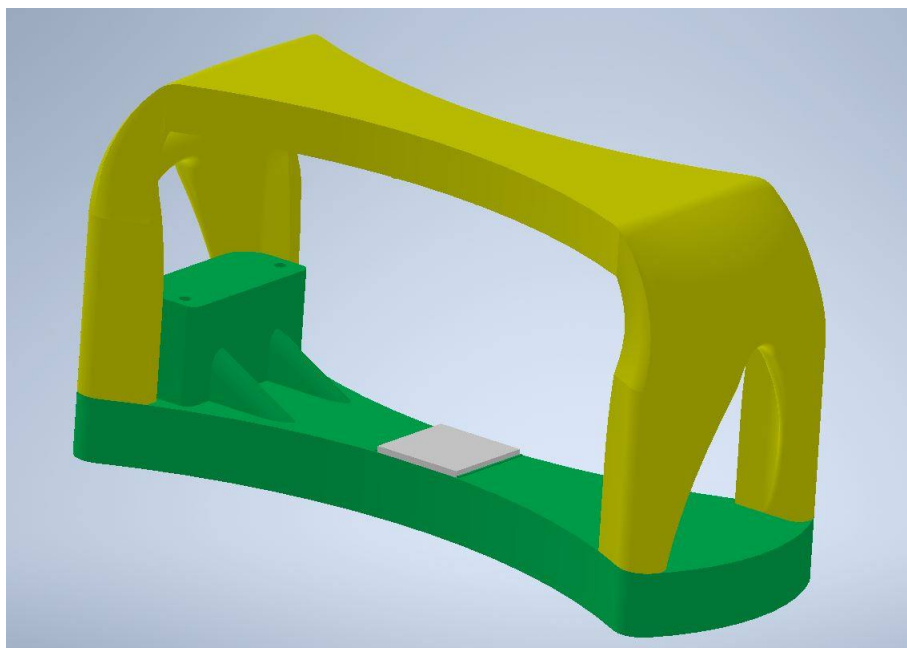
Pre vnútorné magnety boli vybrané neodymové magnetické kvádre o rozmeroch 10x5x2 mm, ktoré sú magnetizované taktiež kolmo na plochu. Tieto magnety boli navrhnuté tak, aby sa presne zhodovali s magnetmi, ktoré už boli využité v bakalárskej práci: *Vibračný generátor pre letecké aplikácie* [12] od autora Ing. Ondreja Rubeša. Tým bolo možné lepšie pozorovať, či je navrhované riešenie vibračného generátora s planžetovým uložením zlepšením alebo naopak zhoršením oproti vibračnému generátoru vyrobeného Ing. Rubešom. Magnety sú lepené na ocelovú podložku o rozmeroch 30x20x5 mm, tak, aby štyri magnety vedľa seba vytvorili jednu magnetickú plochu.



Obr. 6.6: Návrh nalepených magnetov na ocelovú podložku

6.2.2 Základňa

Základňa sa rovnako nezaobišla bez zmien. Pôvodná konštrukcia v tvare písmena L sa zmenila na čosi robustnejšiu konštrukciu. Finálna podoba základne sa skladá z dvoch dielcov, ktoré sa spájajú skrutkami v každom z ich rohov. Spodná časť má podstavec pre uchytenie planžety a priestor pre nalepenie magnetu. Vrchná časť bola tvarovaná tak, aby držala jeden vrchný magnet a aby bolo možné celý generátor jednoducho uchopiť.



Obr. 6.7: Konečný návrh základne

Takmer všetky dielce použité na vibračnom generátore s planžetovým uložením boli navrhnuté tak, aby ich bolo možné vytlačiť pomocou metódy 3D tlače. S hotovým návrhom generátora bolo možné posunúť túto záverečnú prácu o krok ďalej, a zistiť ako sa navrhnutá geometria generátora bude chovať. Preto bolo rozhodnuté o vytvorení niekoľkých simulácií.

7 Simulácie generátora

Simulovanie akýchkoľvek procesov je jednou z najmodernejších technológií, ktoré významnou mierou prispievajú k efektívnemu a rýchlemu procesu výroby. Jednou z popredných výhod simulácií je flexibilita. Vďaka simuláciám je možné promptne reagovať na akékoľvek zmeny, ktoré nastanú v celom procese návrhu a výroby. Vytváranie fungujúceho simulácieho modelu má taktiež svoje postupnosti. Nakoľko bolo snahou nájsť čo najpresnejšie zosúladenie komponentov a materiálov, tak ani pri tvorbe tejto záverečnej práce nebol vynechaný krok simulácie. Preto bolo rozhodnuté o rozdelení simulácií na dve základne časti:

- Magnetická simulácia
- Simulácia dynamiky sústavy

Prvou požiadavkou bolo zistiť správanie magnetov, ako tých vnútorných - ktoré vytvárajú magnetické pole pre elektromagnetickú indukciu, tak aj tých vonkajších pre zistenie veľkosti magnetických síl. Táto postupnosť rozdelenia etáp mala svoje opodstatnenie. Výsledky magnetických simulácií boli vstupom pre mechanickú analýzu. V mechanickej analýze bolo potrebné zistiť nielen chovanie a namáhanie kmitajúceho rámu, ale aj jeho mechanické vlastnosti.

7.1 Magnetická simulácia

Pre poznanie správania magnetov a získania napríklad veľkosť magnetického poľa, bol využitý program **Finite Element Method Magnetics**, skratkou **FEMM 4.2**. Tento program je vytvorený pre platformu Windows. Ide o rovinný riešič, ktorý využíva metódu konečných prvkov na riešenie najmä magnetických a elektrostatických problémov, ale aj problémov elektrického toku prúdu alebo tepla.

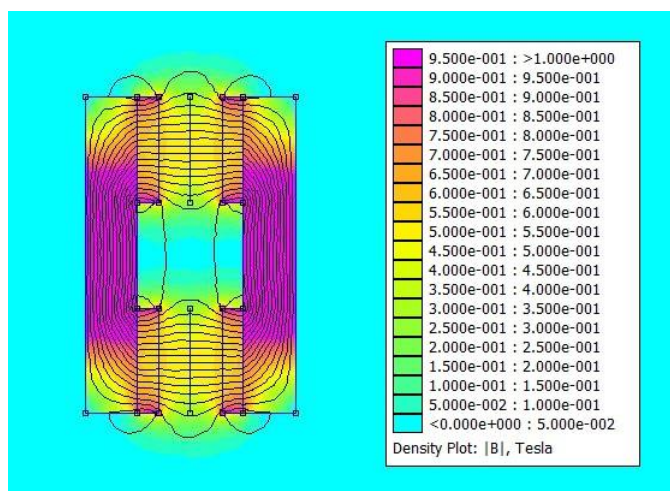
Program je veľmi jednoduchý na ovládanie, no nie je užívateľský prívetivý. Rovinné náčrtky je možné tvoriť priamo v prostredí programu, ale zaberie to mnoho času a úsilia. Práve preto je výhodnejšie využiť podporu skriptovacích programov ako napríklad Octave, Matlab alebo LUA. Do prostredia programu sa vykresľujú body, ktoré sa následne spájajú čiarami. Vzniknutým oblastiam sú priradené vlastnosti materiálov, ako napríklad vzduch, typ magnetov alebo typ ocele. Samozrejmosťou je vytvorenie ohraničenia roviny, v ktorej má byť prevedené riešenie. Po vypočítaní zadaného problému je možné využiť postprocesy na vypočítanie magnetického toku alebo silových účinkov medzi dvoma magnetmi.

Pre intuitívnejšie ovládanie bol využitý program **MATLAB**. Je to výpočtový program zväčša veľmi dobre známy a využívaný v oblastiach strojárstva, vedy a ekonómie.

7 SIMULÁCIE GENERÁTORA

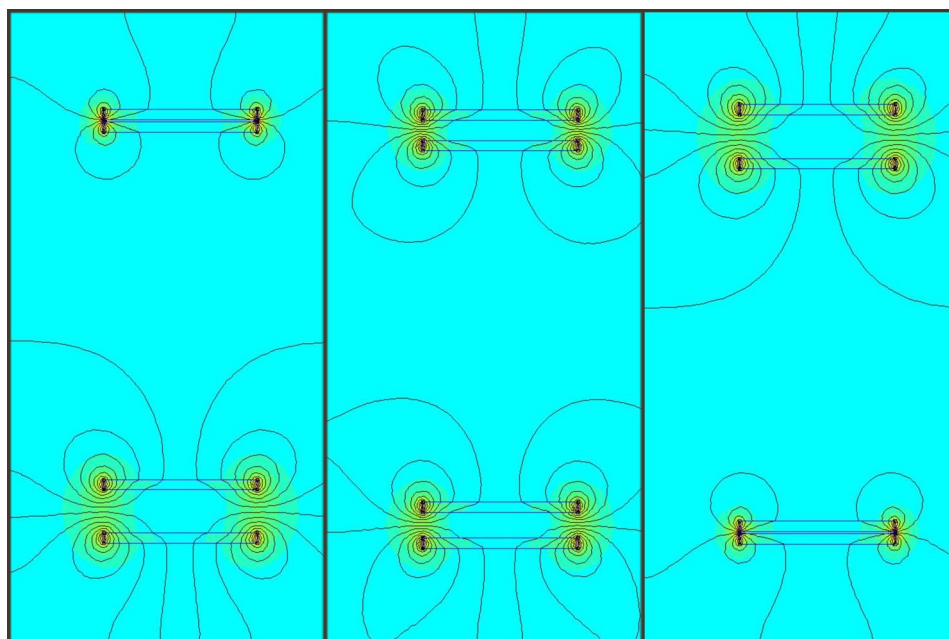
Samotný názov napovedá, že sa jedná o maticové laboratórium. Tento program umožňuje prácu s maticami, vykreslenie funkcií a údajov, implementáciu algoritmov, vytváranie používateľských rozhraní a podobne.

Pomocou programu Matlab boli vytvorené tri základné skripty. Prvý bol vytvorený pre vnútorné magnety s názvom *InnerMagnets.m*. Podstatou tejto časti bolo zistiť silové účinky magnetického poľa v priestore medzi vnútornými magnetmi. Pomocou hustotného grafu na obrázku 7.1 bolo zistené, že veľkosť magnetickej indukcie medzi magnetmi by mala odpovedať približne hodnote $B = 0.5 \text{ [T]}$



Obr. 7.1: Magnetické pole vnútorných magnetov

Druhým skriptom, s názvom *OuterMagnets.m*, bolo simulované chovanie pohybu vonkajších magnetov.

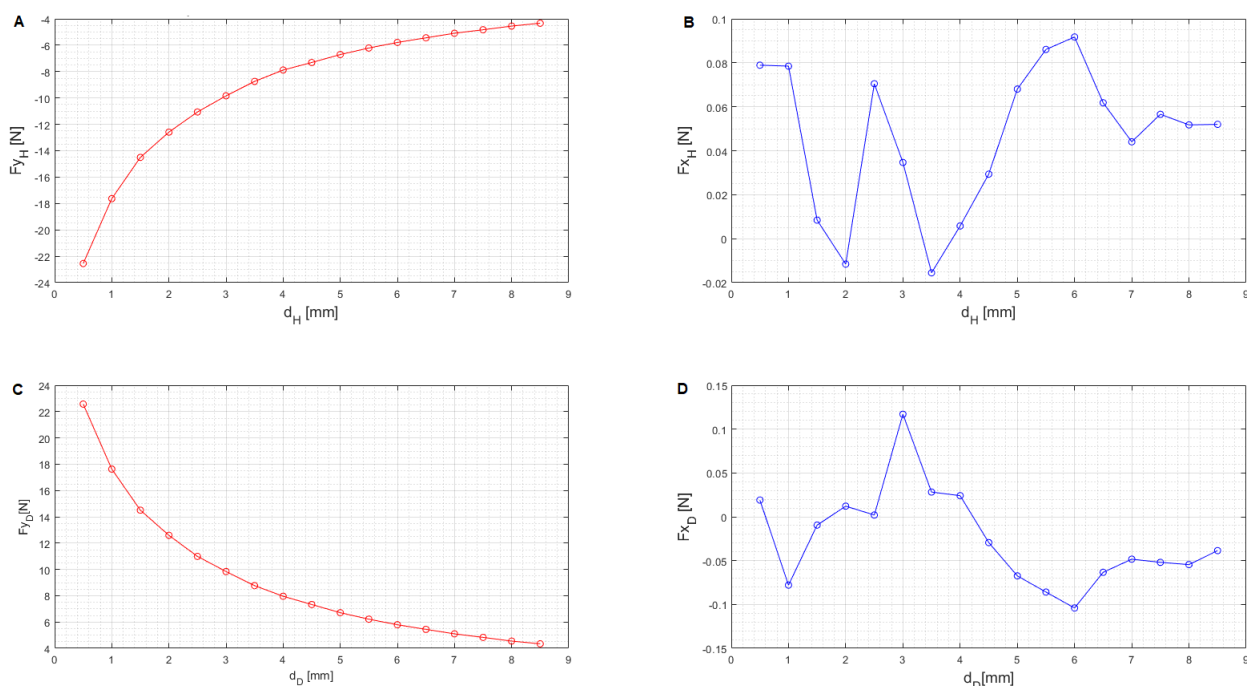


Obr. 7.2: Magnetické pole vonkajších magnetov

7 SIMULÁCIE GENERÁTORA

V tejto časti bolo úlohou zistiť chovanie magnetického poľa vonkajších magnetov a zistiť, aká magnetická sila pôsobí medzi vonkajšími magnetmi.

Simulácia imituje pohyb vonkajších magnetov prilepených na kmitajúci rám. Pohyb začína v predpokladanej maximálnej výchylke kmitajúceho rámu a pokračuje smerom dole, ako je to možné vidieť na obrázku 7.2. Výsledkom tejto simulácie sú štyri grafy. Grafy A, B zobrazujú závislosť sily F_{yH} a F_{xH} na vzájomnej polohe horných magnetov, a grafy C, D zobrazujú závislosť sily F_{yD} a F_{xD} na vzájomnej polohe dolných magnetov.

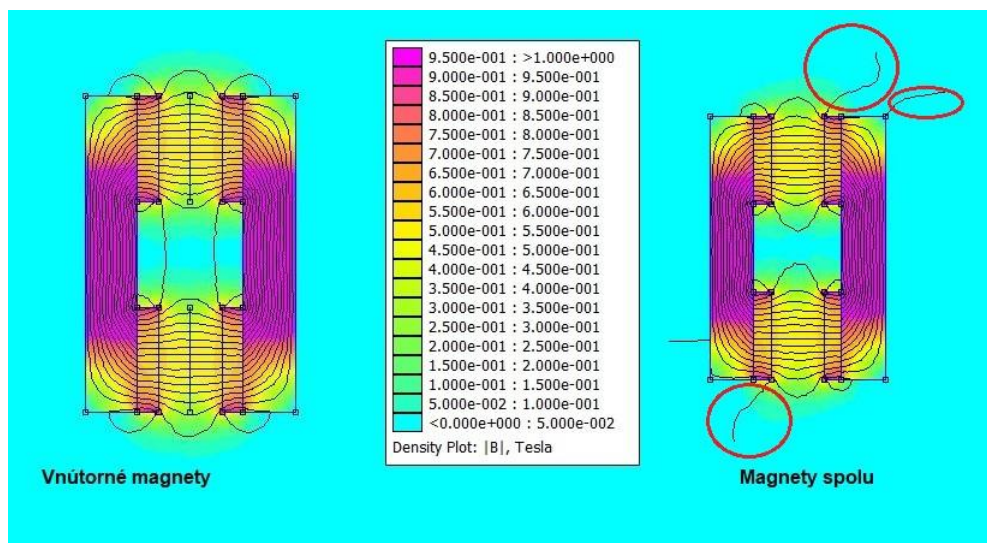


Obr. 7.3: Magnetické sily vonkajších magnetov

Z grafov je zreteľne vidieť, že magnetická sila v ose x - sila F_{xH} a F_{xD} , sú hodnoty, ktorých veľkosť je v priemere len približne 2% z veľkosti síl F_{yH} a F_{yD} . Preto bolo rozhodnuté tieto sily zanedbať pri ďalších úvahách.

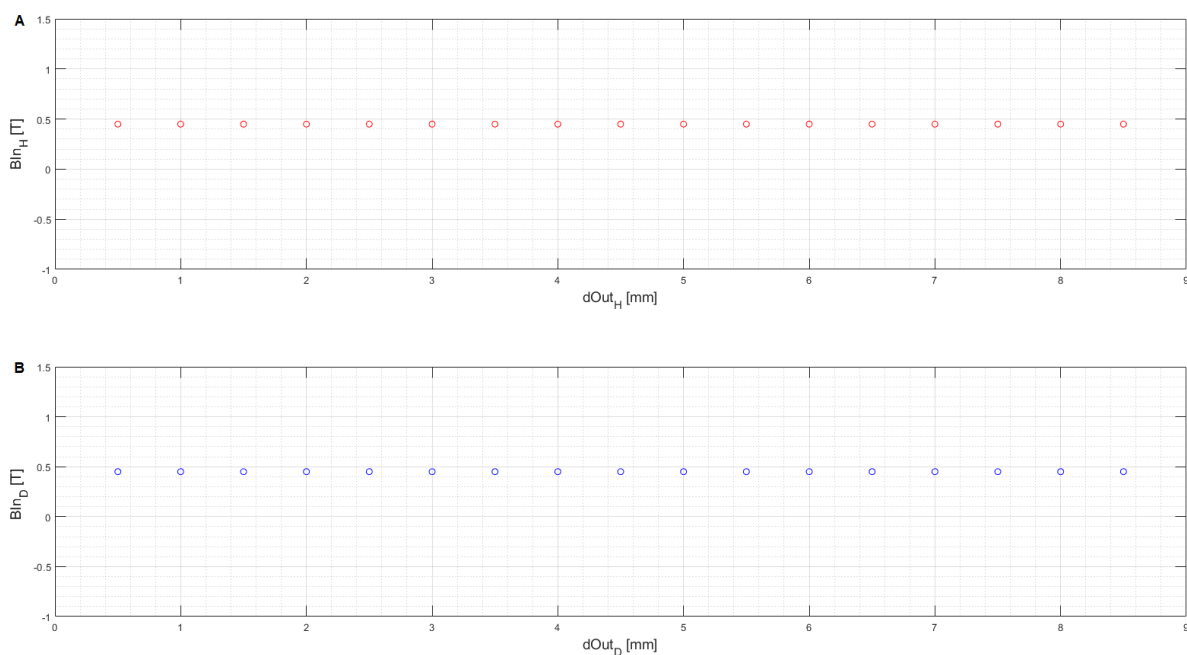
Posledným skriptom, ktorý ovláda program FEMM 4.2 je *AllInOne.m*. V tomto kroku boli vložené vnútorné aj vonkajšie magnety do jednej plochy. Tým bola sledovaná prípadná interakcia vnútorných magnetov s vonkajšími. Ako je možné vidieť na obrázku 7.4, vnútorné magnety nie sú príliš ovplyvňované vonkajšími, až na zopár vyznačených miest červeným krúžkom. Tým bolo dokázané, že navrhnuté rozmery a polohy magnetov vyhovujú a nemusia sa ďalej meniť z magnetického hľadiska.

7 SIMULÁCIE GENERÁTORA



Obr. 7.4: Porovnanie magnetického poľa vnútorných magnetov

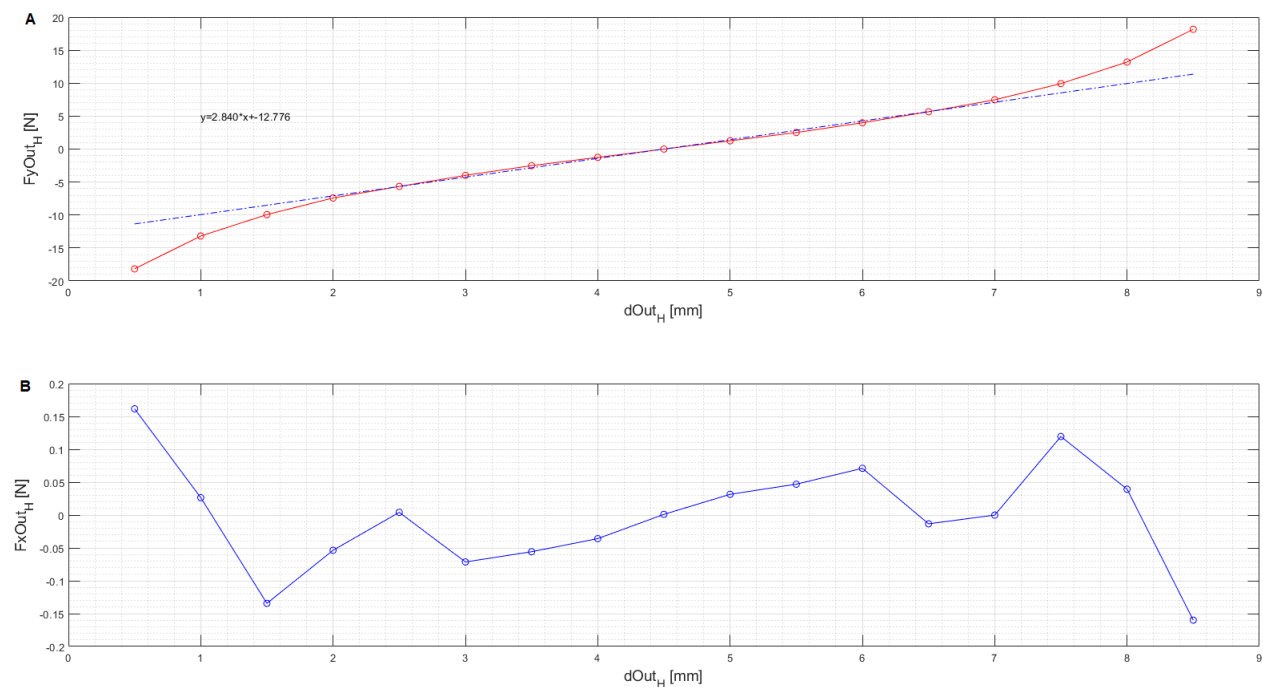
Výsledkom tejto simulácie sú dve figúry. Prvá figúra obsahuje dva grafy 7.5A a 7.5B ktoré zobrazujú priemernú veľkosť magnetického poľa medzi vnútornými magnetmi v závislosti na vzájomnej polohe vonkajších magnetov. Kde BIn_H znamená magnetická indukcia vnútorných magnetov horného radu a BIn_D magnetická indukcia vnútorných magnetov dolného radu. Výsledkom oboch prípadov bolo $B=0.45 [T]$



Obr. 7.5: Graf závislosti magnetickej indukcie vnútorných magnetov na vzdialenosti vonkajších magnetov

7 SIMULÁCIE GENERÁTORA

Druhá figúra je naozaj podstatná pre ďalšie mechanické simulácie. Graf 7.6A popisuje závislosť zvislej sily F_y medzi vonkajšími hornými magnetmi na ich vzájomnej polohe. Vzniknutá krivka bola preložená regresnou priamkou prvého stupňa v tvare $y=kx+b$, kde $k = 2.840 \text{ [N/mm]}$ bolo veľmi podstatné číslo. Tým že sa vonkajšie magnety chovajú ako magnetická pružina, tak číslo k popisuje tuhosť pružiny, čo bolo neskôr využité pre mechanickú simuláciu.



Obr. 7.6: Graf závislosti magnetickej sily horných magnetov F_y a F_x na vzájomnej polohe magnetov

7.2 Simulácia dynamiky sústavy

V magnetických simuláciách bolo sledované chovanie magnetov pomocou programov k tomu určených. Pre vytvorenie mechanických analýz bol použitý program **ANSYS**. Je to softvér, ktorý využíva k riešeniam metódu konečných prvkov. Využíva sa na analýzu sily, húževnatosti, pružnosti, rozloženia tepla a podobne. Tento program je výbornou ukážkou toho, ako je možné predpokladať fungovanie výsledného produktu s rôznymi špecifikáciami, bez nutnosti zostavovania niekoľkých variant testovacích kusov. Celá simulácia začína v oblasti *Workbench*, kde je užívateľovi poskytnuté niekoľko druhov systémových analýz. Po vybraní vhodnej analýzy je potrebné definovať geometriu pomocou *DesginModeler*. Najschodnejšou cestou je importovať už predom vytvorené 3D modely. Po importovaní sa užívateľ posúva ďalej ku časti *Mechanical*. V tejto sekcii je možné nastaviť všetky podmienky prostredia pre vybranú analýzu. Od základných nastavení väzieb, definovania zaťaženia, až po výber požadovaných výsledkov ako deformácia, napätie, tlak a podobne.

Pre zjednodušenie riešenie bolo predpokladané, že podstavec generátora s hlavným uložením planžety je tuhý natoľko, aby nebol ovplyvnený kmitaním rámu s magnetmi. Preto boli mechanickej analýze podrobené iba planžeta s plne nastrojeným kmitajúcim rámom.

Pôvodne sa ponúkalo niekoľko možností rozmerov planžiet. Dĺžka bola 100 mm u všetkých rovnaká, ale líšili sa v šírke 10, 15 alebo 30 mm a hrúbke 0.1, 0.3 a 0.5 mm.

Na samom začiatku boli vybrané predpokladané materiály oceľ, plast PLA a NdFeB magnet.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data				Description
2	Material				
3	Magnet			Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Polyactic acid (PLA)			Gra	Polyactide / polylactic acid (PLA) Sample materials data from Granta Design. Additional data and information available through the Granta website. Granta provides no warranty for the accuracy of the data.
5	Structural Steel			Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

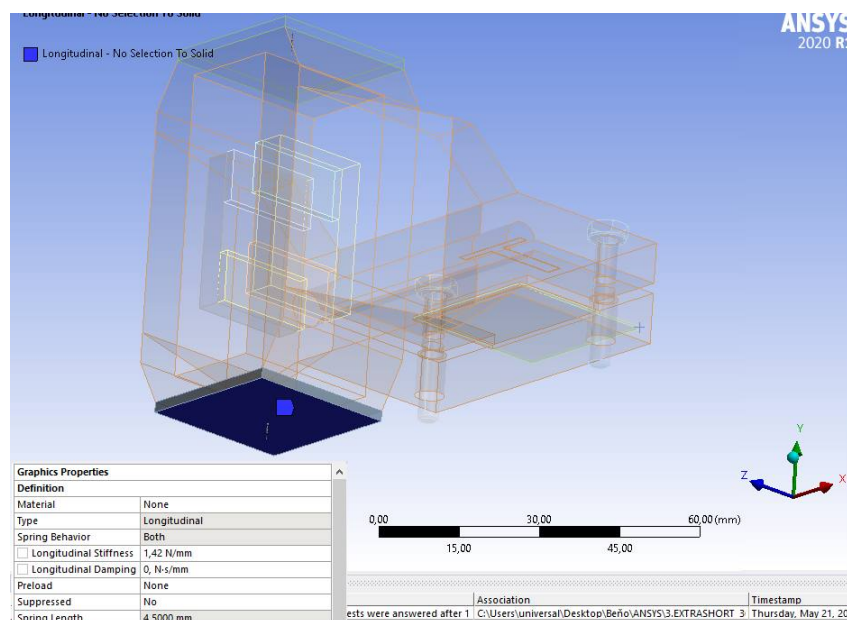
Properties of Outline Row 4: Polyactic acid (PLA)				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Density	312.5	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Isotropic Elasticity			
11	Tensile Yield Strength	5.41E+07	Pa	
12	Tensile Ultimate Strength	5.92E+07	Pa	

Obr. 7.7: Nastavenie materiálov

7 SIMULÁCIE GENERÁTORA

Najväčšiu zmenu je možné pozorovať na obrázku 7.7 u hustoty materiálu PLA. Za normálnych okolností má takýto materiál hustotu $1250 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ ale iteráčným postupom riešenia bolo zistené, že zmenou hustoty PLA materiálu na $312.5 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ by mohlo byť dosiahnuté vyššej frekvencie prvého vlastného tvaru. Malo to aj praktický význam z hľadiska výroby. Pri 3D tlačných výrobkoch sa nepredpokladá 100% výplň. Tým že bola hustota PLA znížená na 25%, tak aj tlač týchto materiálov bola predpokladaná s 25% výplňou.

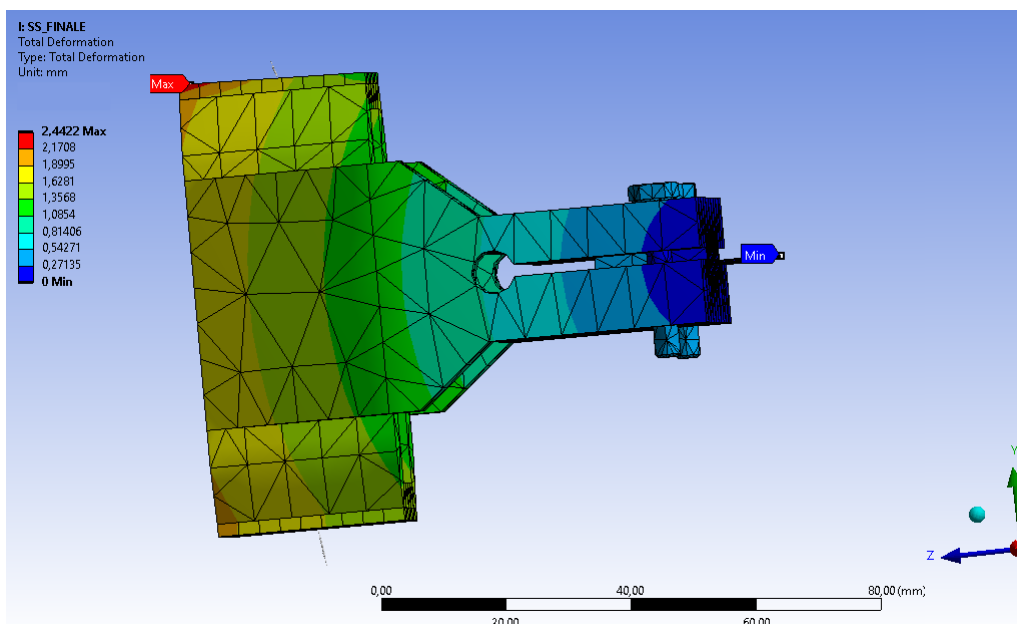
Geometria kmitajúceho rámu bola importovaná cez DesignModeler v *.step* formáte. V časti Mechanical boli prvotne priradené materiály k jednotlivým dielcom a následne určené väzby. Vložili sa dve pružiny na stred horného a dolného magnetu s tuhosťami $k/2$, kde číslo k bolo získané pomocou magnetickej analýzy popísanej v predošlej sekcii. Tieto pružiny simulovali chovanie vonkajších magnetov. Ďalej bolo nastavené votknutie planžety a záťažová sila.



Obr. 7.8: Definovanie tuhosti a dĺžky pružín

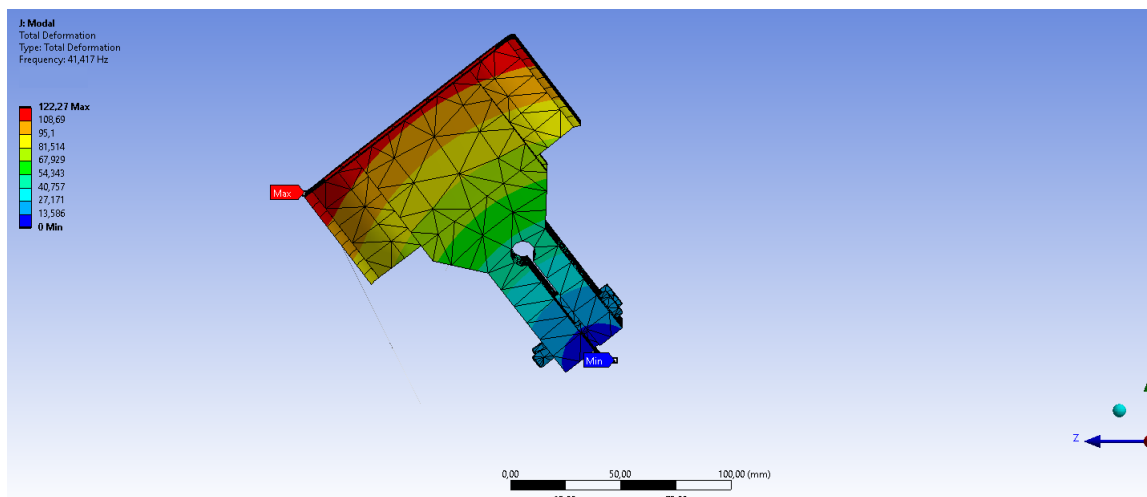
7 SIMULÁCIE GENERÁTORA

Po prevedení všetkých nastavení sa zahájila statická a modálna analýza. Pri statickej analýze bolo prevedené riešenie totálnej deformácie. Tým bola analyzovaná deformácia v miestach, kde sa očakávala najväčšia amplitúda výchýliek, čiže miesta na konci kmitajúceho rámu. Na priloženom obrázku 7.9 je možné pozorovať naozaj len malé deformácie kmitajúceho rámu na jeho konci.



Obr. 7.9: Statická analýza

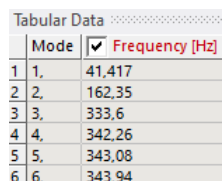
Modálnou analýzou boli zisťované tvary vlastných frekvencií a ich hodnoty. Súčasne s modálnou analýzou bola upravovaná geometria kmitajúceho rámu. Cieľom bolo čo najviac vylepšiť prvý tvar vlastnej frekvencie.



Obr. 7.10: Tvar prvej vlastnej frekvencie modálnej analýzy

7 SIMULÁCIE GENERÁTORA

Vylepšením sa dá rozumieť čo najčistejšie kmitanie v ose y , bez vedľajších krútení a otočení do ostatných osí. Úsilím bolo dostať ďalšie tvary do frekvencií mnohonásobne vyšších než tvar prvej vlastnej frekvencie. Táto snaha sa podarila, čo je možné vidieť na obrázku 7.11.



	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1.	41,417
2	2.	162,35
3	3.	333,6
4	4.	342,26
5	5.	343,08
6	6.	343,94

Obr. 7.11: Hodnoty vlastných frekvencií

Pri analyzovaní sa nezabúdalo na výber vhodného rozmeru planžety. Najprv bolo vyberané z rozdielných širok planžiet. Takmer každý rozmer planžety bol podrobený mechanickej analýze. Najužšia planžeta 10mm absolútne nevyhovovala, nakoľko v jej prípade dochádzalo ku vysokému krúteniu do strán už pri prvom vlastnom tvare kmitania. 15 mm šírka bola vhodnejšia, no stále frekvencia druhého tvaru vlastného kmitania bola veľmi blízko prvému tvaru. Ako najoptimálnejšia sa ukázala šírka 30mm. V prípade tejto šírky bolo možné vidieť, že prvý tvar mal podstatne presnejšie kmitanie v jednej rovine bez nechcených krútení do strán. Rovnako bolo prevedené riešenie hrúbky planžiet. Nakoľko planžeta musela udržať váhu kmitajúceho rámu, tak pri analýze najlepšie obstála tá najsilnejšia planžeta o hrúbke 0.5mm. Napriek všetkým vyššie spomenutým výberom neboli výsledky dostatočne uspokojivé, a preto sa začalo experimentovať s dĺžkou planžety. Ukázalo sa, že ak sa aktívna dĺžka planžety (dĺžka planžety ktorá kmitá a nie je pevné vložená v uloženiach) radikálne zníži, tak je možné získať omnoho presnejší tvar prvej vlastnej frekvencie s vyššou hodnotou. Tým pádom znovu prebehlo zopár simulácií, z ktorých bolo zistené, že najvhodnejšia aktívna dĺžka planžety je 10mm.

Po zhodnotení všetkých analýz bolo možné postúpiť do ďalšej etapy záverečnej práce.

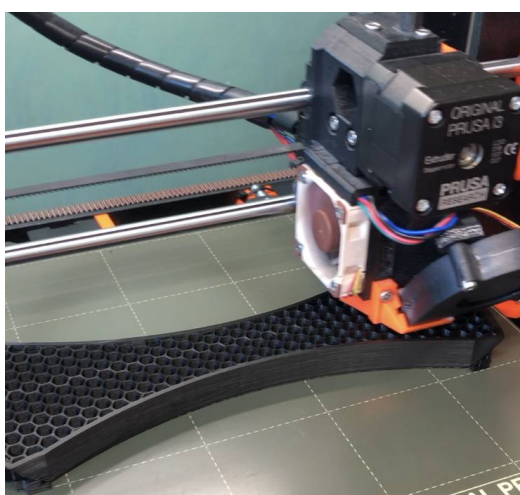
8 Výroba

V predošlej kapitole bolo simulované chovanie generátora pomocou počítačových programov. Následne boli vyladené posledné detaily tak, aby bolo možné začať s fázou výroby. Nakoľko bolo snahou navrhnuť generátor s čo najnižšou výrobnou cenou, do úvahy prichádzalo inovatívne riešenie výroby, a to metódou 3D tlač.

8.1 3D tlač

Všetky dielce okrem planžety a magnetov boli realizované metódou 3D tlače. Na 3D vytlačenie jednotlivých dielcov bol použitý prvotriedny program **SIMPLIFY 3D**, ktorý prevádza 3D modely na špecifický zoznam príkazov pre tlačiareň. SIMPLIFY nie je voľne dostupným programom, ale dokáže vytvoriť kvalitné príkazy, čo má takmer najväčší vplyv na kvalitu tlače. V prostredí tohto programu boli definované potrebné nastavenia ako napríklad tvar a hustota výplne, počet vrstiev steny, rýchlosti tlače a podobne. Následným exportovaním príkazov vo formáte gcode do tlačiarne bolo možné zahájiť tlač.

Prvým vytlačeným kusom bol kmitajúci rám. Tento diel bol najzložitejším kusom výroby, keďže bolo potrebné dosiahnuť čo najvyššiu kvalitu. Práve preto museli byť parametre tlače niekoľkokrát ladené podľa potrieb. Súbežne s výrobou kmitajúceho rámu bola jemne modifikovaná aj základňa až k jej finálnej podobe a následné posunutá do fázy tlačenie. Poslednými 3D tlačnými kusmi generátora bolo uloženie planžety a držiak cievky.



Obr. 8.1: Výroba základne generátora

Po úspešnej výrobe jednotlivých dielcov bolo možné prejsť k samotnému zostaveniu generátora. Nakoľko závit vyrobený pomocou 3D tlače nemá dostatočnú pevnosť, siahnuté bolo po mosadzných závitových vložkách. Závitové vložky boli lisované za tepla do plastu, čím sa vytvorilo pevné uloženie vložky a tak bolo možné poskladať celý generátor skrutkovými spojmi.

8.2 Lepenie magnetov

Pre čo najpresnejšie vycentrovanie magnetov tvoriacich magnetickú pružinu boli na základni vytvorené bočné zarážky tak, aby bolo možné magnet nalepiť medzi nich a tým pádom zamedziť akémukoľvek nechcenému posunutiu mimo miesta navrhnutia. Magnety boli lepené pomocou lepidla *Pattex Extreme Resisatnce*. Podľa technického listu pre uvedené lepidlo je predpísaná teplota spracovania od 5°C do 40°C. Pri viacerých pokusoch o nalepenie magnetov bolo zistené, že po nalepení je vhodnejšia nižšia teplota pre vytvorenie pevnejšieho spoju. Preto boli nalepené magnety na jednotlivé dielce vložené do chladničky, kde teplota dosahovala okolo 8°C. Po zhotovení magnetov ktoré tvoria magnetickú pružinu bolo možné začať s lepením malých magnetov na kovovú podložku. Malé magnety boli lepené na ocelové podložky o rozmeroch 30 × 20 mm. V tejto fáze nastal problém. Nakoľko bolo náročné fixovať malé magnety vedľa seba tak, aby vytvorili jeden súvislý magnetický povrch a neboli jeden voči druhému posunuté, vytvorené boli tri pomocné prípravky na lepenie.



Obr. 8.2: Fixačné prípravky na lepenie vnútorných magnetov

8 VÝROBA

Prvý magnet v rade bol nalepený voľne a zarovnaný na hrany podložky. Ďalšie magnety boli lepené pomocou prípravkov v tvare písmena U. Na ich spodnej časti bol vytvorený výber s rozmermi pre dva, tri a nakoniec štyri magnety.



Obr. 8.3: Proces lepenia magnetov na oceľovú podložku

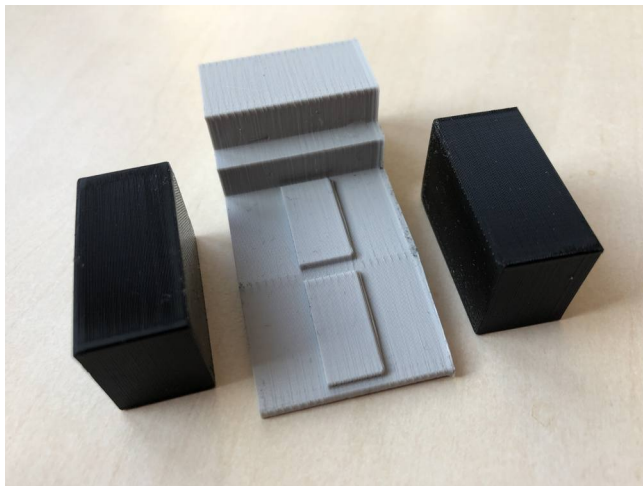
Po kompletizácii vnútorných magnetov bolo možné ich lepenie do vnútra kmitajúceho rámu. Opäť bolo veľmi dôležité presné umiestnenie. Lepenie prvej podložky s magnetmi bolo prevedené pomocou ďalšieho prípravku, ktorým bolo možné nalepiť magnety presne a pevne na miesto určené podľa návrhu. Lepidlo bolo nanesené na zadnú stranu oceľovej podložky a potom bola podložka vložená do rámu. Následne bola celá podložka fixovaná prípravkom podľa obrázku 8.4



Obr. 8.4: Dištančná vložka pre nalepenie podložky s magnetmi do rámu

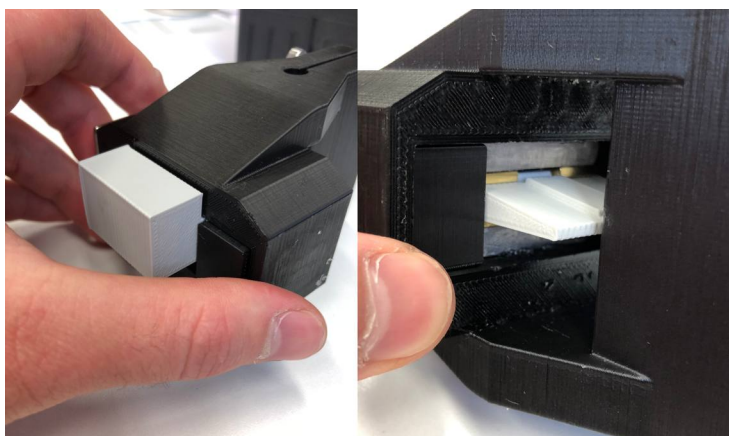
8 VÝROBA

Lepenie druhej strany magnetov bolo veľkou výzvou. Nakoľko medzera medzi podložkami s magnetmi bola iba *6 mm*, bolo naozaj veľmi zložité nalepiť tieto podložky bez toho, aby sa magnety nepritiahli navzájom.



Obr. 8.5: Klin s bočnicami

Pre zjednodušenie a čo najpresnejšie umiestnenie bol vyrobený klin s naklonenou rovinou a vodiacou drážkou. Druhá podložka s magnetmi bola položená na naklonenú rovinu a spoločne s klinom vsunutá do vnútra rámu. Po 24 hodinách bolo lepidlo vytvrdnuté a klin odstránený.



Obr. 8.6: Proces lepenia magnetov do vnútra rámu

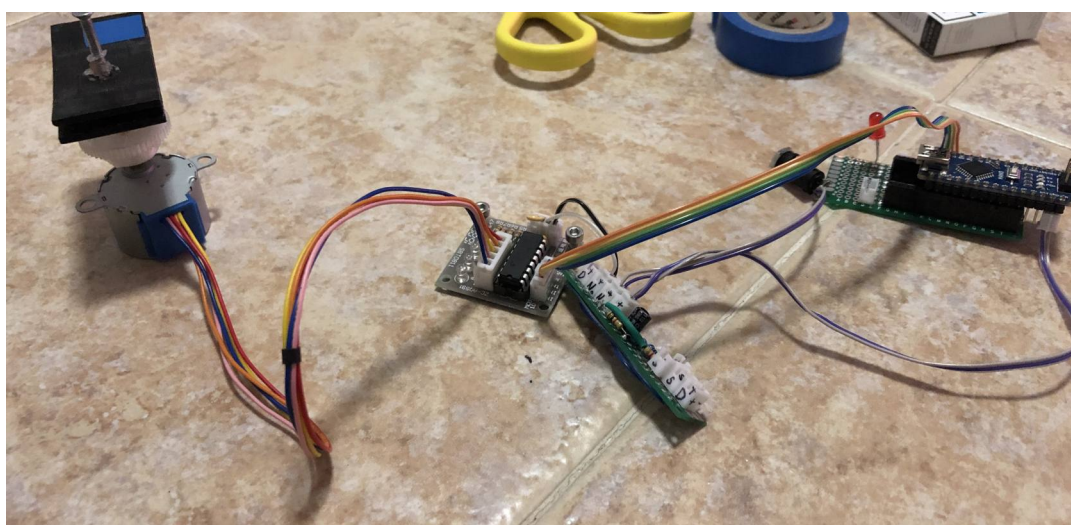
8.3 Výroba cievky

Posledným úkonom k vytúženému zostaveniu bolo vyhotovenie cievky namotáním tenkého medeného drôtu. Pre túto aplikáciu bol vybraný drôt o priemere 0.1 mm. Navíjač cievky bol vyrobený s dierou uprostred. Skrz túto dieru bola vložená skrutka, ktorej hlavička sa uchytila do elektrickej vŕtačky. Tým bolo navíjanie cievky značne urýchlené.



Obr. 8.7: Výroba cievky

Navíjanie cievky pomocou vŕtačky bolo rozhodne rýchlym procesom, ale nie účinným. Keďže otáčky vŕtačky nie je možné presne regulovať, došlo niekoľkokrát ku poškodeniu cievky tým, že sa drôt utrhol a navíjanie bolo potrebné opakovať. Pre efektívnejší spôsob navíjania bol vyvinutý jednoduchý navíjač pomocou krokového motorčeka a arduina. Celé zariadenie bolo nastavené na 100 otáčok po ktorých sa motorček zastavil. Po zastavení bolo možné naniesť tenkú vrstvu laku na cievku a spustiť proces znova. S určitostou je možné povedať, že takéto navíjanie je pomalším procesom, ale veľkou výhodou je zaručený presný počet otáčok a menšia pravdepodobnosť poškodenia drôtu.



Obr. 8.8: Arduino navíjač

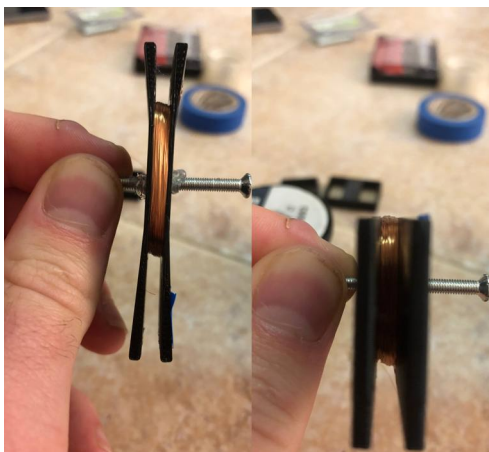
8 VÝROBA

Podľa navrhnutého 3D modelu bol priestor pre cievku o rozmeroch 3×6 mm. Teoretickým výpočtom bol určený počet predpokladaného počtu závitov ako:

$$N = \frac{a \times b}{d^2} \quad (8.1)$$

$$N = \frac{3 \times 6}{0.1^2} = 1800z \quad (8.2)$$

Každopádne takýto výpočet je len čisto teoretickým výpočtom. Od reality sa značne líši. Tým, že je cievka vinutá ručne, dochádza ku prelínaniu jednotlivých vrstiev drôtu čoho dôsledkom je menší počet závitov. V tomto prípade bolo namotaných 1000 závitov s vrstvou laku po každých 100 otáčkach.



Obr. 8.9: Hotová cievka

Po dokončení cievky boli všetky dielce pripravené a tým bolo možné celý generátor zložiť podľa návrhu. Reálnou výrobou prvého kusu generátora bolo možné posunúť túto prácu do jej záverečnej etapy.

9 Meranie charakteristík generátora a porovnanie s pôvodným typom

Vo fázy keď boli hotové všetky návrhy, simulácie a prvý kus generátora vyhotovený bolo možné zahájiť finálnu etapu a podrobiť spomínaný generátor testovaniu a niekoľkým meraniam. Cieľom bolo zistiť či sa vyrobený generátor vôbec hýbe a ďalej zisťovať jeho frekvenčné charakteristiky. Priebeh meraní bol rozdelený do dvoch etáp

- Porovnanie s východzím generátorom
- Meranie frekvenčných charakteristík vyrobeného generátora

Poslednou úpravou pred začatím merania charakteristík bolo napájanie konektora na konce cievky pre lepšiu manipuláciu a jednoduché pripojenie ku osciloskopu.



Obr. 9.1: Úprava koncov cievky

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM

9.1 Porovnanie s východzím generátorom

Pôvodný *vibračný generátor pre letecké aplikácie* [12] zostrojený Ing. Ondrejom Rubešom bol vytvorený so značne odlišnou konštrukciou než nový *vibračný generátor s planžetovým uložením* ktorý je predmetom tejto záverečnej práci. Rozdiel konštrukcií je zobrazený na obrázku 9.2.



Obr. 9.2: Východzí generátor (vľavo); Nový generátor (vpravo)

Už na prvý pohľad je vidieť markantné rozdiely v konštrukcii. Hoci je vibrační generátor pre letecké aplikácie zložený iba z dvoch častí, je možné vidieť jeho veľmi náročnú konštrukciu. Niekoľko záhybov, magnety osadené pod uhlom, zložitá výroba a podobne. Naopak u vibračného generátoru predstaveného touto záverečnou prácou je geometria značne jednoduchšia aj napriek tomu, že sa skláda z viacerých komponent. Veľké rozdiely je možné vidieť pri hmotnostiach jednotlivých častí.

Hmotnosti generátora		
	pre letecké aplikácie	s planžetovým uložením
$m_{rám} [g]$	40	385
$m_{kmitajúca} [g]$	130	170
$m_{celková} [g]$	170	555

Tabuľka 9.1: Porovnanie hmotností pôvodného a nového generátora

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM

Pre čo najlepšie porovnanie boli oba generátory podrobené meraniam. U každého z generátorov boli vykonané dve merania:

- voľný kmit bez záťaže
- kmit pri záťaži 2000Ω

Generátory boli otestované takmer pri identických podmienkach s rovnakou frekvenciou kmitu. Hodnota ξ bola pre každý prípad určená experimentálne. Pre lepšie zrovnanie generátorov boli u každého merania vypočítané hodnoty:

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (9.1)$$

Kde Ω je výpočet vlastnej frekvencie.

$$\delta = \xi \cdot \Omega \quad (9.2)$$

Kde δ je logaritmický dekrement útlmu alebo tzv. koeficient doznievania a ξ je pomerný útlm.

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \xi} \quad (9.3)$$

Q je faktor kvality ktorý popisuje kvalitu mechanického spracovania.

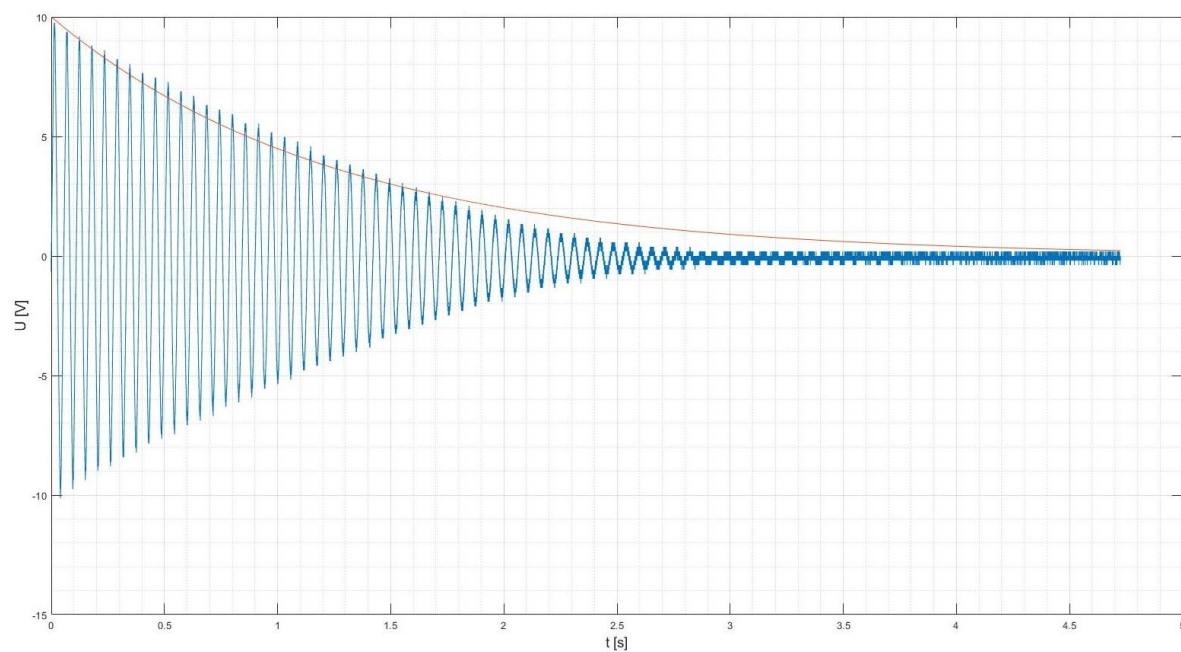
Namerané hodnoty pre oba generátory boli vynesené do grafov a preložené obálkami kmitania podľa vzorca

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\delta \cdot t} \quad (9.4)$$

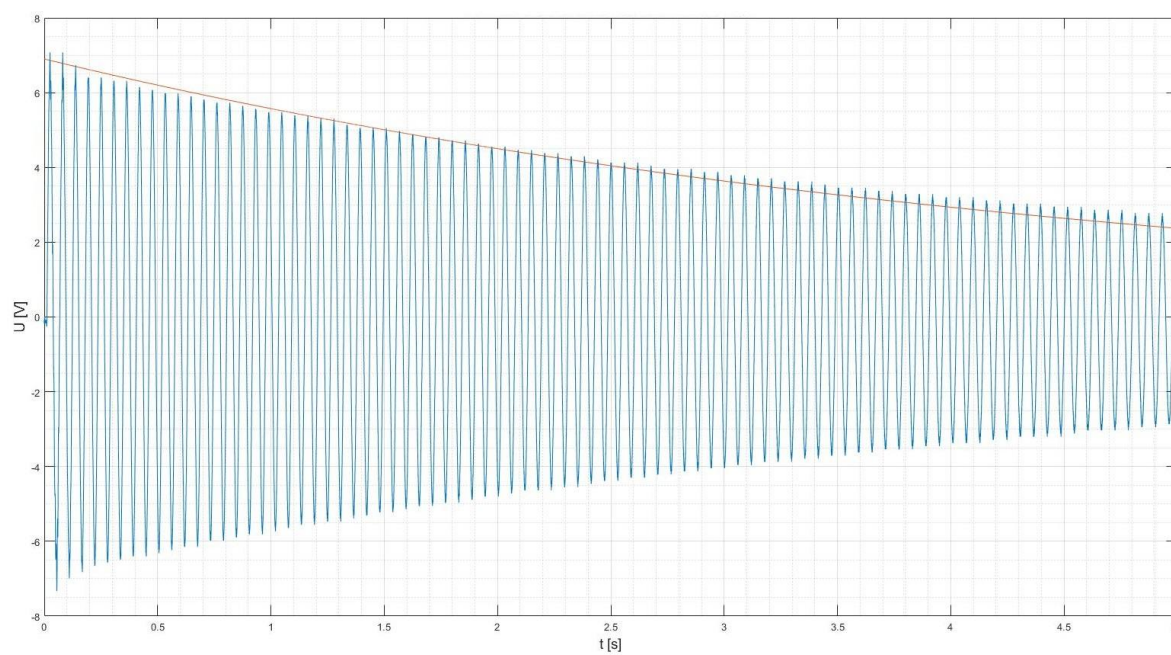
9.1.1 Meranie charakteristík voľného kmitu bez záťaže

Na obrázkoch 9.3 a 9.4 je možné pozorovať grafy priebehu tlmeného kmitania s vykreslenými obálkami. Už na prvý pohľad je zreteľné, že tlmené kmitanie u vibračného generátora s planžetovým uložením je časovo niekoľkonásobne dlhšie než u vibračného generátora pre letecké aplikácie. To napovedá o nižšom tlmení kmitania v prospech planžetového uloženia. Ďalej je možné u oboch priebehov vidieť malé odchýlky amplitúd od vypočítaných obálok. Tie mohli byť spôsobené okolitými parazitnými vibráciami počas merania.

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM



Obr. 9.3: Tlmené kmitanie bez záťaže: Vibračný generátor pre letecké aplikácie



Obr. 9.4: Tlmené kmitanie bez záťaže: Vibračný generátor s planžetovým uložením

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM

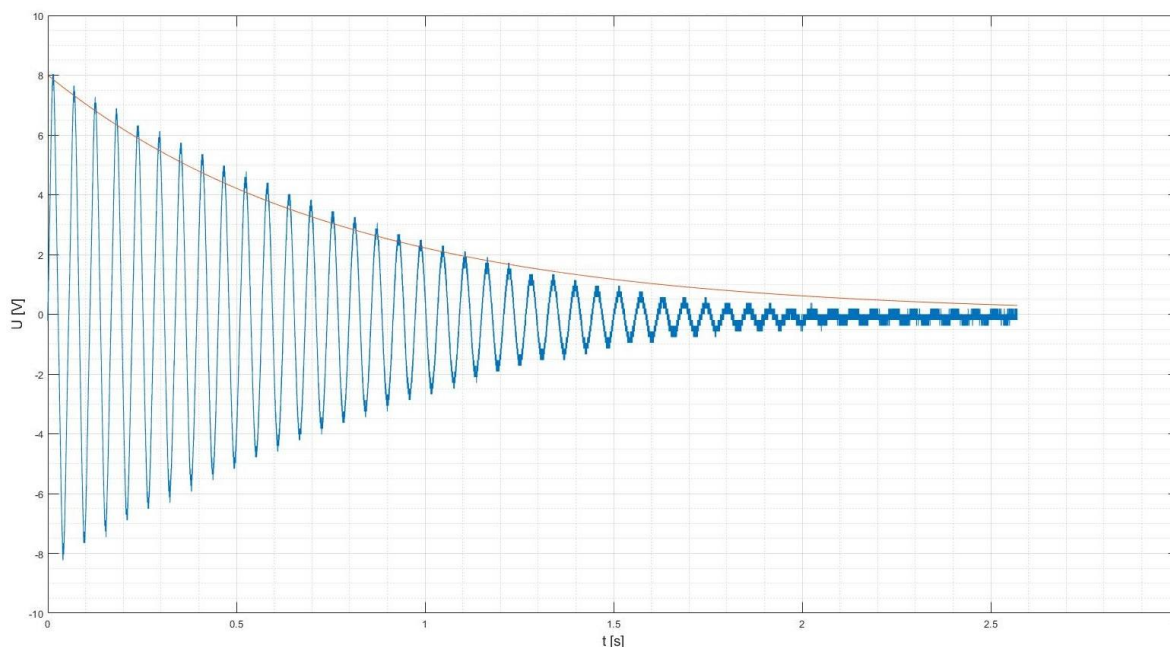
Nie len pozorovaním grafov na priložených obrázkoch, ale aj z doložených vypočítaných hodnôt je možné vidieť, že faktor kvality Q je takmer štyrikrát násobne vyšší u vibračného generátoru s planžetovým uložením než u vibračného generátoru pre letecké aplikácie. Nakoľko tlmenie je nežiaducim elementom, bolo snahou ho znížiť čo najviac. Z vypočítaného pomerného útlmu ξ pre oba prípady je zreteľné, že u vibračného generátoru s planžetovým uložením je takmer o štyrikrát menší - tak ako tomu napovedal už prvý pohľad na grafy na obrázkoch 9.3 a 9.4.

Vibračný generátor		
	pre letecké aplikácie	s planžetovým uložením
$f [Hz]$	17	17
$\xi [-]$	0,0075	0,002
$Q [-]$	66,67	250

Tabuľka 9.2: Určené hodnoty tlmeného kmitania bez záťaže

9.1.2 Meranie charakteristík voľného kmitu so záťažou 2000 Ω

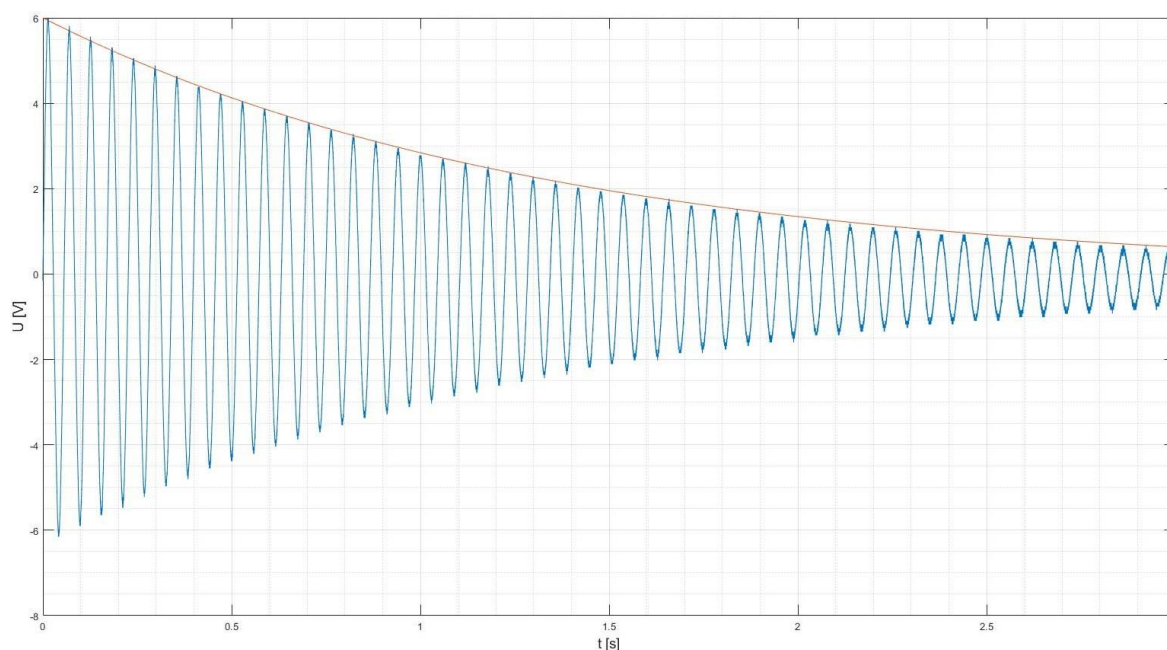
Pre potvrdenie výsledkov z prvého merania bolo merania u oboch generátorov opakované. Opäť boli dané zhodné podmienky ako v predošlom meraní až na jeden rozdiel. Meranie bolo prevedené so záťažou na cievke o veľkosti $R = 2000 \Omega$. Hodnoty namerané pomocou osciloskopu boli znovu vynesené do grafov a preložené obálkami kmitania.



Obr. 9.5: Tlmené kmitanie so záťažou: Vibračný generátor pre letecké aplikácie

Na obrázkoch 9.5 a 9.6 je tento krát možné vidieť priebehy tlmeného kmitania so záťažou na cievke 2000 Ω . V tomto prípade so záťažou je možné vidieť takmer dokonalý priebeh u vibračného generátoru s planžetovým uložením. Odchýlky amplitúd od vypočítanej obálky sú pozoruhodne malé.

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM



Obr. 9.6: Tlmené kmitanie so záťažou: Vibračný generátor s planžetovým uložením

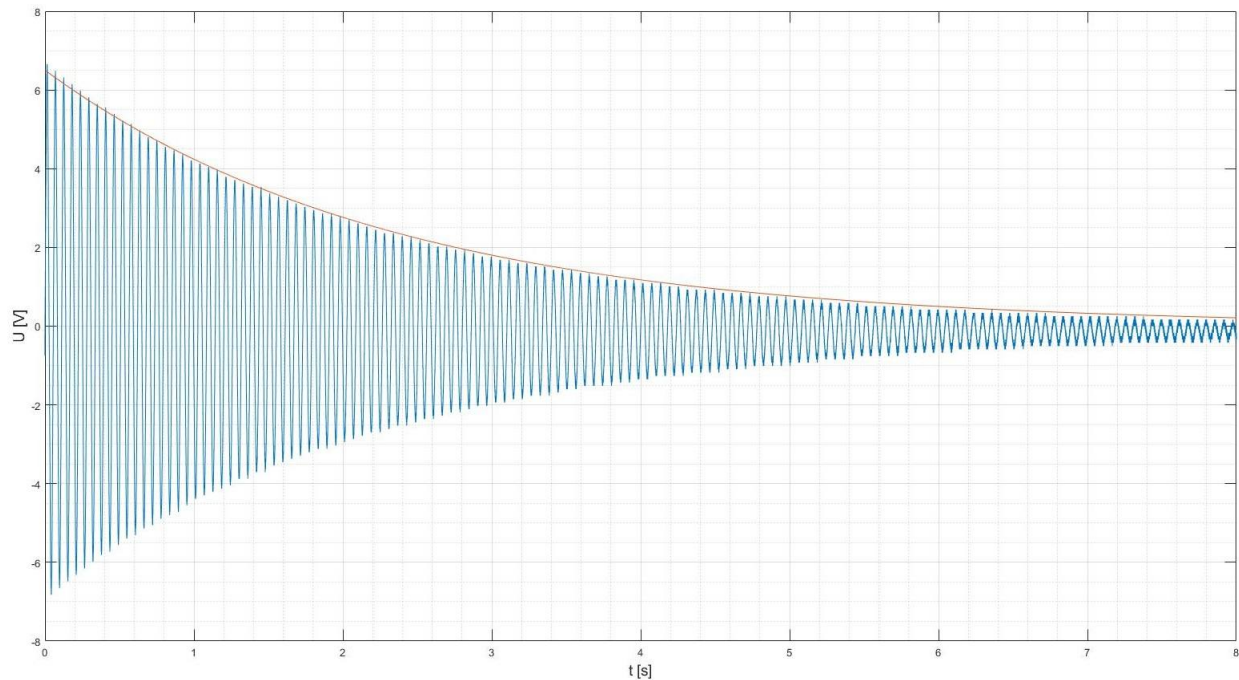
Vibračný generátor		
	pre letecké aplikácie	s planžetovým uložením
$f [Hz]$	17	17
$\xi [-]$	0,012	0,007
$Q [-]$	41,67	71,43

Tabuľka 9.3: Určené hodnoty tlmeného kmitania so záťažou na cievke 2000Ω

Vypočítané hodnoty pomocou vzorcov 9.1, 9.2 a 9.3 pre tlmenie so záťažou ukazujú rovnaký trend, ako pri tlmení bez záťaže. Pomerný útlm ξ je opäť nižší pre vibračný generátor s planžetovým uložením než u vibračného generátoru pre letecké aplikácie. Taktiež faktor kvality Q je vyšší pre planžetové uloženie. Tým je možné povedať, že kvalita mechanického spracovania je lepšia u vibračného generátoru s planžetovým uložením.

9.1.3 Meranie optimálnej záťaže

Poslednému meraniu, ktorého graf je vyneseny na obrázku 9.7, pre tlmené kmitanie bol podrobený vibračný generátor s planžetovým uložením pri optimálnej záťaži 5200Ω . Koeficient doznievania bol vypočítaný ako $\delta = 0,43$, a faktor kvality $Q = 125$.



Obr. 9.7: Tlmené kmitanie s optimálnou záťažou

Ná základe grafov na obrázkoch 9.4 a 9.7 bola experimentálne určená elektrická záťaž 5200Ω s ktorou sa po celú dobu meralo. Pri meraní bez záťaže platilo že:

$$\xi_m = \xi_1 + \xi_e(R = \infty) \quad (9.5)$$

Kde ξ_m predstavuje mechanický pomerný útlm, ξ_1 pomerný útlm pri meraní bez záťaže a ξ_e predstavuje elektrický pomerný útlm. ξ_e bolo pri meraní bez záťaže rovné 0. Teda z toho vyplýva

$$\xi_m = \xi_1 \quad (9.6)$$

Ďalej bol braný do úvahy predpoklad že $b_e = b_m$, a to platí vtedy keď [13] :

$$\xi_e = \xi_m \quad (9.7)$$

Optimálny odpor záťaže bol hľadaný experimentálne tak, aby platilo:

$$\xi_2 = \xi_m + \xi_e(R) \quad (9.8)$$

Kde ξ_2 predstavuje mechanický pomerný útlm pri meraní s hľadanou optimálnou záťažou. Podľa rovnice 9.7 je možné potom tento vzťah upraviť ako:

$$\xi_2 = 2 \cdot \xi_m \quad (9.9)$$

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM

Pri meraní tlmeného kmitu bez záťaže bolo ξ_1 určené experimentálne ako $\xi_1 = 0,002$. Po dosadení tejto hodnoty do vzorca 9.9 bola určená hodnota pomerného útlmu ako $\xi_2 = 0,004$. Optimálny odpor bol určený tak, aby namerané hodnoty amplitúdy v grafe na obrázku 9.7 odpovedali čo najpresnejšie vypočítanej obálke pomocou rovnice 9.4.

9.2 Meranie frekvenčných charakteristík vyrobeného generátora

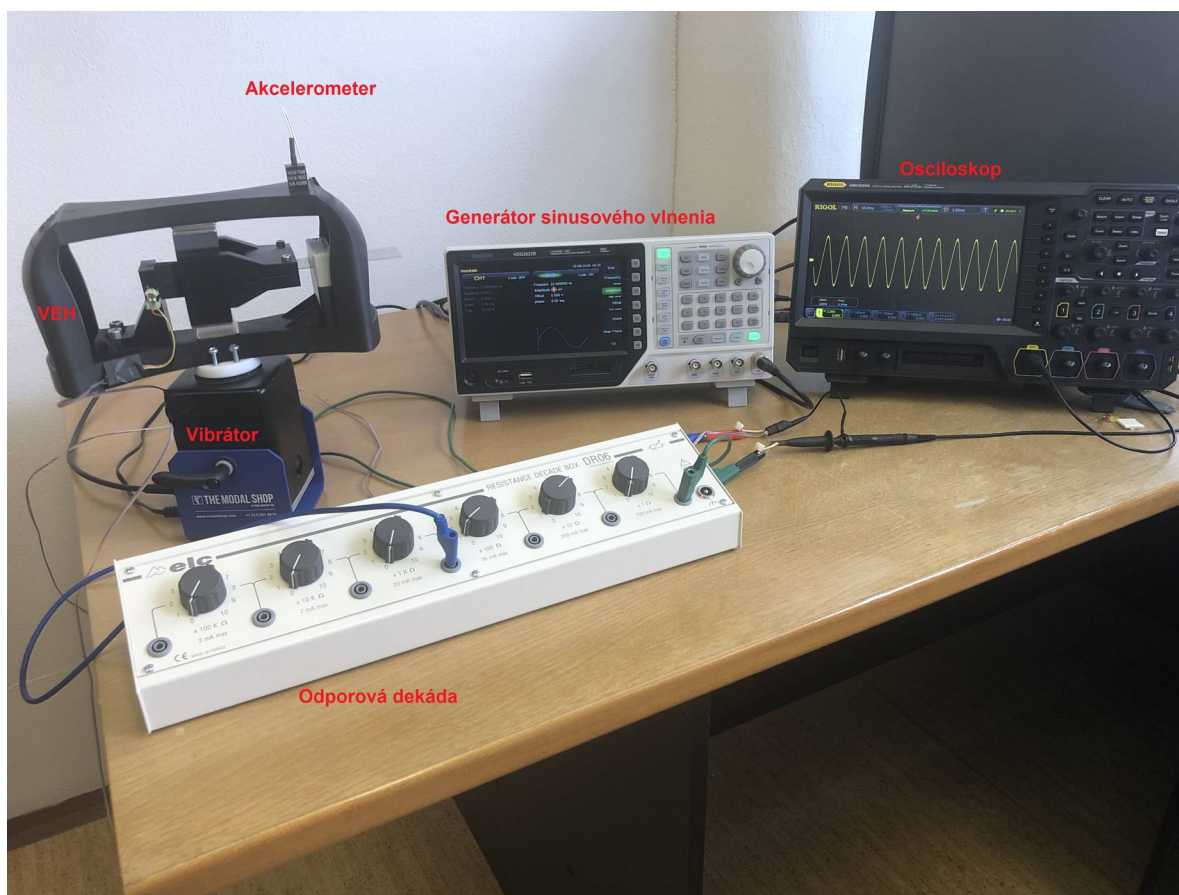
V kapitole 7 sa zistilo pomocou programu ANSYS, že celá konštrukcia by mala kmitať prvým vlastným tvarom pri frekvencii 41.4 Hz . Bohužiaľ, to bola iba simulácia a realita sa značne líšila. Meranie preukázalo, že uvádzaný generátor kmitá prvou vlastnou frekvenciou pri hodnote 17 Hz , čo je rapídny pokles hodnoty prvej vlastnej frekvencie. Takáto zmena bola podľa všetkého zapríčinená nevhodnými magnetmi osadenými na magnetickú pružinu. Magnety sa mali odpudzovať v celej šírke pásma výchylky. Testovaním bolo zistené, že v určitej vzdialenosti a pod určitým uhlom je chovanie magnetov nevyspytateľné. Magnety sa neodpudzovali, ale naopak priťahovali čo značne ovplyvnilo celkové chovanie generátora. Za ďalší aspekt ktorý nekorektne ovplyvnil veľký pokles frekvencie sa pokladá samotný program FEMM 4.2. Nakoľko sa jedná o rovinný riešič je veľkou neznámou čo sa deje v tretom rozmere. Taktiež bolo v tomto programe prevedené riešenie tak, že sa jedná o priamočiary pohyb vonkajších magnetov čo ale v skutočnosti nie je pravdou keďže sa jedná o pohyb krivočiary.

Generátor sa uložil na zdroj vibrácií a aretoval sa skrutkami z boku. Pripojil sa osciloskop a záťaž na cievku o veľkosti $R = 5200\Omega$ pomocou odporového dekádového boxu, ako je možné vidieť na obrázku 9.8. Na vrchnú časť základne bol umiestnený akcelerometer ktorý sledoval zrýchlenie základne.

Meranie charakteristík generátora bolo pre lepšie poznanie prevedené niekoľkokrát. Merania boli teda nasledovné:

- Meranie napäťovo frekvenčnej charakteristiky so záťažou a zrýchlením základne 10 mg
 - pri stúpajúcej frekvencii
 - pri klesajúcej frekvencii
- Meranie napäťovo frekvenčnej charakteristiky so záťažou a zrýchlením základne 20 mg
 - pri stúpajúcej frekvencii
 - pri klesajúcej frekvencii

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM



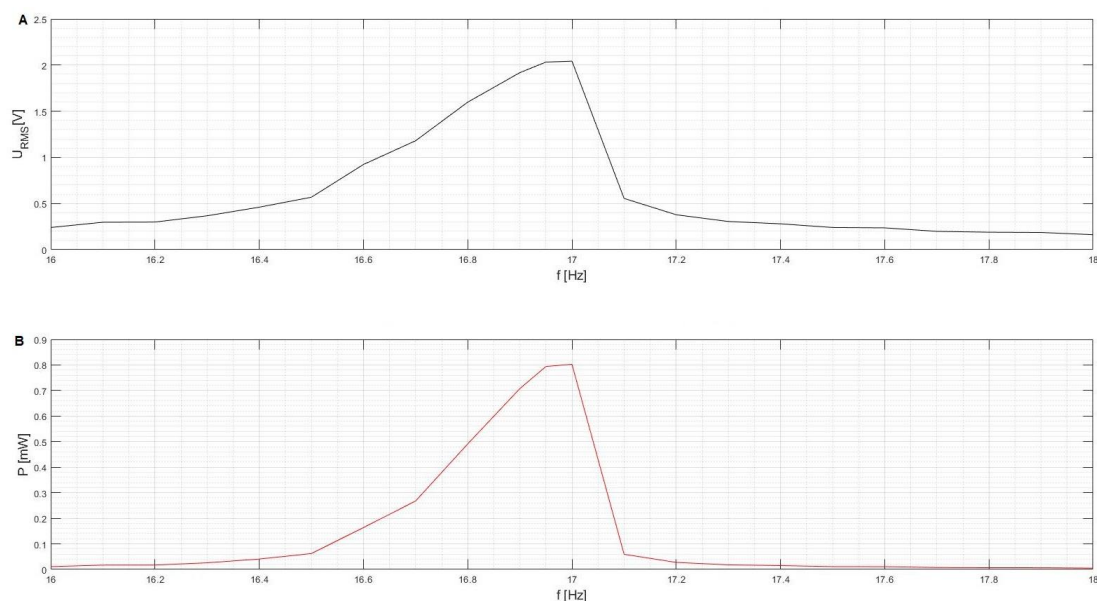
Obr. 9.8: Meracia sústava

Výstupom z meraní bolo niekoľko grafov popisujúcich chovanie generátora. Ako prvé boli vytvorené napäťovo - frekvenčné a výkonovo - frekvenčné charakteristiky generátora. Tieto merania popísali odozvu zostrojeného VEH na určité pásmo budiacich frekvencií. Merania boli založené na harmonickom sínusovom budení, s krokovou zmenou frekvencie o veľkosti kroku 0.1 Hz a s premenlivou amplitúdou vstupného signálu. Amplitúdu bolo potrebné meniť z dôvodu udržania konštantného zrýchlenia základne generátora. Z každého merania boli použité namerané hodnoty efektívneho napätia U_{RMS} na výpočet výkonu

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (9.10)$$

Graf na obrázku 9.9, popisuje charakteristiku generátora v pásme najefektívnejších budiacich frekvenciách $16 - 18 \text{ Hz}$, pri konštantnej záťaži 5200Ω a pri udržaní konštantného zrýchlenia 10 mg . Hodnoty efektívneho napätia boli namerané pri zvyšovaní frekvencie budiacich vibrácií s krokom 0.1 Hz a následne použité k dopočítaniu výkonu P .

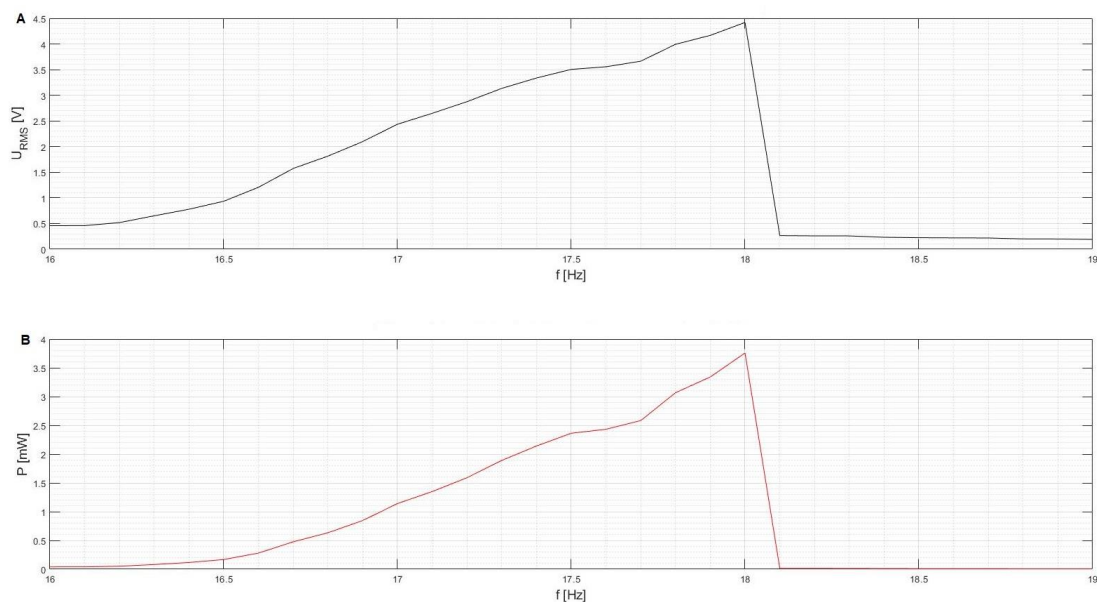
9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM



Obr. 9.9: Charakteristika generátora pri zrýchlení základne 10 mg

Graf 9.3 A popisuje napäťovo - frekvenčnú charakteristiku, a graf 9.3 B výkonovo - frekvenčnú charakteristiku.

Graf na obrázku 9.10 popisuje charakteristiku generátora, v jemne širšom pásme budiacich frekvencií 16 - 19 Hz pri udržiavaní zrýchlenia základne na konštantnej hodnote 20 mg. Závaž na cievke a krok zvyšovania frekvencie budiacich vibrácií ostal nezmenený.

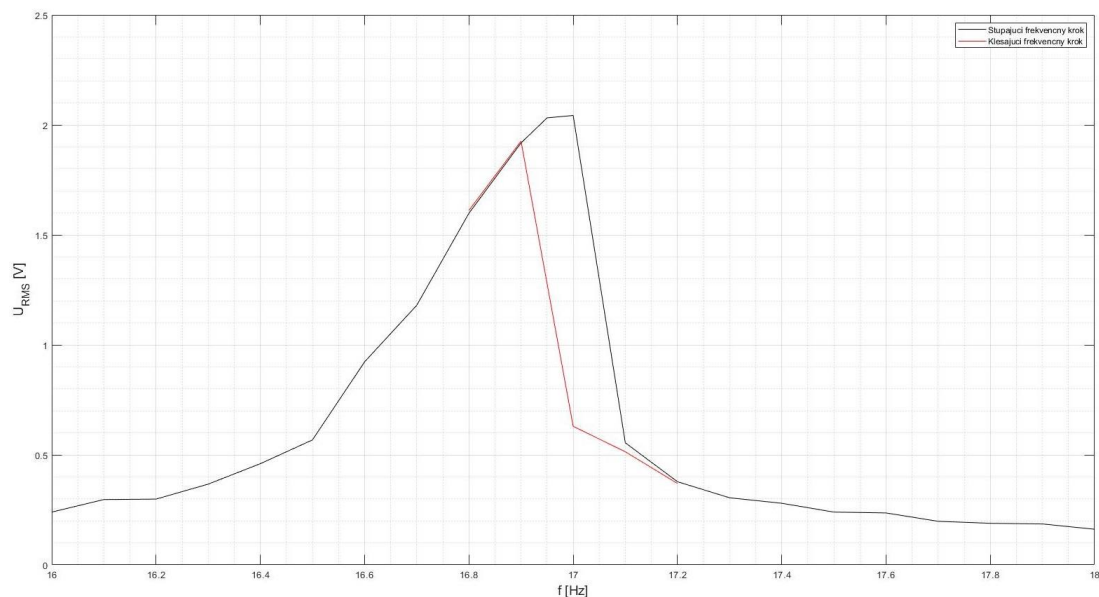


Obr. 9.10: Charakteristika generátora pri zrýchlení základne 20 mg

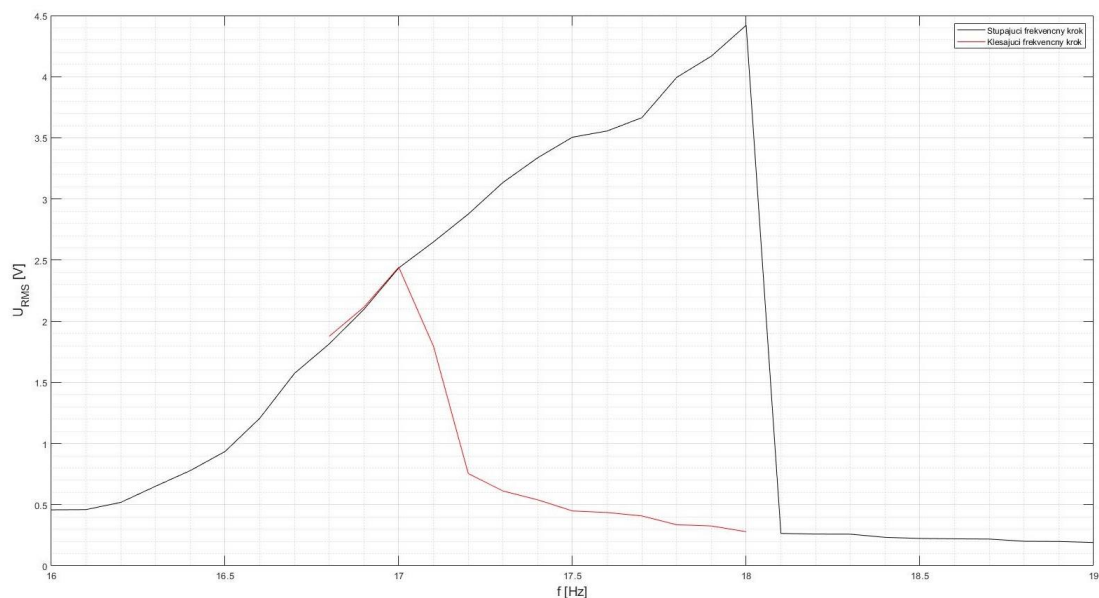
Graf 9.4 A popisuje napäťovo - frekvenčnú charakteristiku, a graf 9.4 B výkonovo - frekvenčnú charakteristiku.

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM

Pre dôkladnejšie porozumenie chovania generátora s planžetovým uložením boli uskutočnené prejazdy cez rezonančnú frekvenciu z oboch strán. Nakoľko je tuhosť pri predstavanom generátore tvorená odpudzujúcimi sa magnetmi, bolo potrebné prekontrolovať možnú nestabilitu.



Obr. 9.11: Prejazd cez rezonančnú frekvenciu z oboch strán pri zrýchlení základne 10 mg



Obr. 9.12: Prejazd cez rezonančnú frekvenciu z oboch strán pri zrýchlení základne 20 mg

9 MERANIE CHARAKTERISTÍK GENERÁTORA A POROVNANIE S PÔVODNÝM TYPOM

Vo vyobrazených grafoch na obrázkoch 9.11 a 9.12 je možné úplne presne pozorovať pásmo nestability. Pri zrýchlení základne 20 mg je pásmo nestability v rozmedzí $17 - 18,1\text{ Hz}$. V prípade keď základňa kmitá so zrýchlením 10 mg je pásmo nestability v nižších frekvenciách, a to v rozmedzí $16,9 - 17,2\text{ Hz}$. Je to dané tým, že pre jednu frekvenciu vzniká viacero riešení. V týchto oblastiach nie je možné dopredu predikovať počet možných riešení. Je možné vidieť že pásmo nestability sa rozširuje a tým je zreteľné že sa jedná o tvrdnúcu charakteristiku.

Maximálna hodnota U_{RMS} bola nameraná $2,9\text{ V}$, pri frekvencii $f = 22\text{ Hz}$, so zrýchlením základne 2 g . Z toho bol vypočítaný maximálny výstupný výkon ako $P = 49,4706\text{ mW}$.

Z nameranej kmitajúcej hmotností v tabuľke 9.2 potom vyplýva, že generovaný výkon na 100 g kmitajúcej hmoty je

$$P_{100} = \frac{P}{m} = \frac{49,4706}{1,7} = 29,1\text{ mW}/100\text{g} \quad (9.11)$$

10 Záver

V úvode rešeršnej časti záverečnej práce je krátko popísané získavanie energie z ambientných zdrojov. Ďalej popisuje vibrácie ako potenciálny zdroj energie a zároveň poukazuje na variácie metód premeny energie z okolitých vibrácií na elektrickú energiu. Následujúca kapitola efektívne zhrňuje a popisuje už existujúce vibračné EH generátory fungujúce na rôznych princípoch. Ukázalo sa však, že navrhované riešenia ponúkali zväčša nízky výstupný výkon, alebo vysoké náklady na výrobu.

Ďalšie kapitoly sa zamerali najmä na vývoj konštrukcie pre vibračný generátor s planžetovým uložením. Práca obsahovala logické postupy od počiatočného návrhu, cez simulácie a výrobu až ku finálnemu porovnaniu s východnou konštrukciou.

V úvode praktickej časti bola popísaná koncepcia návrhu vibračného generátora, ktorá pozostáva z dvoch základných častí (mechanická a elektromagnetická časť). V každom zo svojich bodov načrtla smer akým sa následný návrh, simulácia a výroba uberali.

Následujúca kapitola *Návrh geometrie* je prvou kľúčovou kapitolou. Kapitola celkom jasne popísala návrh od jeho prvotnej podoby až po finálnu verziu. Návrh geometrie generátora bolo časovo konzumpčný. Snahou bolo vytvoriť kompaktné riešenie návrhu, ktoré by bolo nie len funkčné, ale aj jednoduché na výrobu. Niekoľkokrát bol zmenený spôsob uchytenia planžety, ale aj celková geometria generátora.

Nadväzujúca kapitolou *Simulácie generátora* ponúka niekoľko magnetických simulácií a mechanických analýz. Keďže žijeme v modernej dobe, bola využitá dvojica simulačných programov. Snahou bolo opätovné logické prerozdelenie kapitoly. Výstup magnetickej simulácie bol vstupom pre mechanickú analýzu. Úspešnými simuláciami bolo zistené, že geometria generátora vyhovuje.

V predposlednej fázy bol vyrobený prvý kus generátora pomocou inovatívnej metódy 3D tlače. Snahou bolo doceliť čo najlepšiu kvalitu výrobku. Pre nalepenie magnetov na presne určené pozície, navinutie cievky a podobným úkonom bolo vytvorených niekoľko technických postupov s jedinečnými prípravkami určenými pre každý jeden krok. Celková kvalita spracovania bola dosiahnutá ako veľmi dobrá.

Záver bakalárskej práce sa nezaobišiel bez presnejšieho poznania charakteristiky generátora. Preto bolo v poslednej kapitole uvedené viacero meraní charakteristík vibračného generátora s planžetovým uložením a ich následne porovnanie s vibračným generátorom pre letecké aplikácie. Generátor, ktorý je predmetom záverečnej práce, dosahuje pomerne skvelých výsledkov. Navrhnutý generátor by bolo možné aplikovať v niektorých oblastiach strojnictva ako napr.: napájanie nenáročných senzorov, prostredie dopravy s rovnakým zámerom napájania senzorov, snímačov a podobných zariadení.

10 ZÁVER

Vyhotovený generátor nadmieru splnil požiadavky a očakávanie autora. Nakoľko sa jedná o prvý koncept svojho druhu má isté nedostatky, ktorými by sa mohol prípadný ďalší vývoj pokojne zaoberať. Ponúka sa hneď niekoľko možných vylepšení. Sú nimi napríklad: zmena typu horizontálnych magnetov, zmena geometrie základne a výroba flexibilného uloženia pre prípadne potreby zmeny aktívnej dĺžky planžety.

Výstupom záverečnej práce je v prvom rade niekoľko magnetických a mechanických simulácií. Ďalej sú to 3D počítačové modely, pomocou ktorých je možné predstavený generátor rýchlo a jednoducho vyrobiť. Nepodstatným, ale veľmi nápomocným výstupom, je niekoľko navrhnutých technických riešení, ktoré značne zjednodušujú výrobu. Posledným a najdôležitejším, je plne funkčný vibračný generátor s planžetovým uložením, ktorého výroba je lacná a nenáročná.

Zoznam skratiek a symbolov

EH Energy Harvesting

MEMS Mikroelektromechanické systémy

PMTLG Lineárny generátor s permanentnými magnetmi

VUT Vysoké Učení Technické v Brně

Literatúra

- [1] Institute of Physics *Energy Harvesting*. For physics - For physicists - For all : Institute of Physics [online].[cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.iop.org/resources/energy/index.html>
- [2] C. B. Williams and R. B. Yates, "Analysis Of A Micro-electric Generator For Microsystems," *Proceedings of the International Solid-State Sensors and Actuators Conference - TRANSDUCERS '95*, Stockholm, Sweden, 1995, pp. 369-372.
- [3] ReVibe Energy - Welcome to the world of vibrations. *Energy Harvesting* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://revibeenergy.com/energyharvesting/>
- [4] X. Jiang, Y. Li and J. Li, "Design of a novel linear permanent magnet vibration energy harvester," *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Wollongong, NSW, 2013, pp. 1090-1095.
- [5] KUČERA, D. *Koncepce tlačítkového piezo-generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2012. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..
- [6] S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White, *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications* 2006 Meas. Sci. Technol. **17** R175–R195 [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/17/12/R01>
- [7] IDC Technologies, *Quantum Mechanics-Electromagnetic induction* . Resources - Technical References - Electrical Engineering-Technical References [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Quantum_Mechanics_Electromagnetic_Induction.pdf
- [8] C. R. Saha, T. O'Donnell, N. Wang and P. McCloskey, "Electromagnetic generator harvesting energy from human motion", *Sensors and Actuators – A: Physical*, volume 147, Issue 1, 2008. Sensors and Actuators A Physical. 147. 10.1016/j.sna.2008.03.008.
- [9] RHINEFRANK, K, E.B AGAMLOH, A VON JOUANNE, et al. Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy. *Renewable Energy* [online]. Elsevier, 2006, 31(9), 1279-1298 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/j.renene.2005.07.005. ISSN 0960-1481.
- [10] J. Prudell, M. Stoddard, T. K. A. Brekken and A. von Jouanne, "A novel permanent magnet tubular linear generator for ocean wave energy," *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, 2009, pp. 3641-3646.

LITERATÚRA

- [11] HADAS, Z. a C. ONDRUSEK. Nonlinear spring-less electromagnetic vibration energy harvesting system. The European Physical Journal Special Topics [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, 224(14-15), 2881-2896 [cit. 2020-05-10]. DOI: 10.1140/epjst/e2015-02595-3. ISSN 1951-6355.
- [12] RUBEŠ, O. Vibrační generátor pro letecké aplikace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..
- [13] NOËL E. DUTOIT, BRIAN L. WARDLE and SANG-GOOK KIM. Design Considerations For MEMS-Scale Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesters, Integrated Ferroelectrics 2005, 71:1, 121-160, DOI: 10.1080/10584580590964574

Zoznam obrázkov

3.1	Princíp piezoelektrického javu	13
3.2	Premenlivé prekryvanie dosiek v rovine	14
3.3	Uzatváranie medzery v rovine	15
3.4	Uzatváranie medzery mimo rovinu	15
3.5	Diagram Faradayovho pokusu	15
4.1	Schéma generátoru	18
4.2	Štruktúra generátoru s magnetickou pružinou	19
4.3	Porovnanie veľkosti generátoru oproti AA batérií	20
4.4	Model generátoru	21
4.5	Lineárny prierez generátora	21
5.1	Schématicky diagram elektromagnetického vibračného generátora	25
5.2	Schéma premeny energie	25
6.1	Prvotný návrh rámu	27
6.2	Prvotný návrh podstavca	27
6.3	Pôvodné uloženie planžety	28
6.4	Vývoj kmitajúceho rámu	29
6.5	Kmitajúci rám generátora	29
6.6	Návrh lepených magnetov na ocelovú podložku	30
6.7	Konečný návrh základne	31
7.1	Magnetické pole vnútorných magnetov	33
7.2	Magnetické pole vonkajších magnetov	33
7.3	Magnetické sily vonkajších magnetov	34

ZOZNAM OBRÁZKOV

7.4	Porovnanie magnetického poľa vnútorných magnetov	35
7.5	Graf závislosti magnetickej indukcie vnútorných magnetov na vzdialenosti vonkajších magnetov	35
7.6	Graf závislosti magnetickej sily horných magnetov F_y a F_x na vzájomnej polohe magnetov	36
7.7	Nastavenie materiálov	37
7.8	Definovanie tuhosti a dĺžky pružín	38
7.9	Statická analýza	39
7.10	Tvar prvej vlastnej frekvencie modálnej analýzy	39
7.11	Hodnoty vlastných frekvencií	40
8.1	Výroba základne generátora	41
8.2	Fixačné prípravky na lepenie vnútorných magnetov	42
8.3	Proces lepenia magnetov na ocelovú podložku	43
8.4	Dištančná vložka pre nalepenie podložky s magnetmi do rámu	43
8.5	Klin s bočnicami	44
8.6	Proces lepenia magnetov do vnútra rámu	44
8.7	Výroba cievky	45
8.8	Arduino navíjač	45
8.9	Hotová cievka	46
9.1	Úprava koncov cievky	47
9.2	Východzí generátor (vľavo); Nový generátor (vpravo)	48
9.3	Tlmené kmitanie bez záťaže: Vibračný generátor pre letecké aplikácie . . .	50
9.4	Tlmené kmitanie bez záťaže: Vibračný generátor s planžetovým uložením .	50
9.5	Tlmené kmitanie so záťažou: Vibračný generátor pre letecké aplikácie . . .	51
9.6	Tlmené kmitanie so záťažou: Vibračný generátor s planžetovým uložením .	52
9.7	Tlmené kmitanie s optimálnou záťažou	53
9.8	Meracia sústava	55
9.9	Charakteristika generátora pri zrýchlení základne 10 mg	56
9.10	Charakteristika generátora pri zrýchlení základne 20 mg	56

ZOZNAM OBRÁZKOV

9.11	Prejazd cez rezonančnú frekvenciu z oboch strán pri zrýchlení základne 10 mg	57
9.12	Prejazd cez rezonančnú frekvenciu z oboch strán pri zrýchlení základne 20 mg	57

Zoznam tabuliek

9.1	Porovnanie hmotností pôvodného a nového generátora	48
9.2	Určenie hodnoty tlmeného kmitania bez záťaže	51
9.3	Určenie hodnoty tlmeného kmitania so záťažou na cievke $2000\ \Omega$	52